



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

NÁVRH OHŘEVU VYHNÍVACÍ NÁDRŽE THE DESIGN OF THE DIGESTION TANK HEATING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Šimon Cupra

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Bohuslav Kilkovský, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Bc. Šimon Cupra**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Bohuslav Kilkovský, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh ohřevu vyhřívací nádrže

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku návrhu výměníku tepla v nemíchané a míchané nádobě pro potřeby intenzifikace přestupu tepla ve vyhřívacích nádržích. V rámci zamyšlené inovace uvažuje společnost KUNST o rozšíření dodávky vystrojení vyhřívací nádrže o interní výměník tepla, který by mohl v kombinaci s čerpadlem AMV 400 dosahovat dobrých výsledků přenosu tepla. Pro tuto aplikaci je nezbytné definovat čerpací charakteristiku míchacího čerpadla a rovněž posoudit vliv osazení čerpadla na hydraulické poměry v nádrži a na přenos tepla. Dále je nutné definovat základní parametry interního výměníku tepla pro dosažení potřebné teplosměnné plochy.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámit se s problematikou výměny tepla v míchaných a nemíchaných nádobách.
2. Zpracovat přehled výpočtových metod pro určení součinitele přestupu tepla v míchaných a nemíchaných nádobách a trubkových hadech.
3. Vytvořit v programu MS Excel výpočtový nástroj na výpočet míchaných a nemíchaných nádob s interním trubkovým výměníkem tepla.
4. Seznámit se se zkušebním standem.
5. Na základě naměřených dat určit čerpací charakteristiky míchacího čerpadla.
6. Popsat vliv míchacího čerpadla na přestup tepla v nádobě.
7. Podaří-li se ještě v rámci diplomové práce zrealizovat měření na reálném provozu (nebo alespoň poloprovozu), tak provést srovnání vypočtených dat s naměřenými daty.

Seznam literatury:

HEWITT G. (Ed.) Heat Exchanger Design Handbook, Begell House, Inc., Redding, CT, USA, 1998.

VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen Ed., VDI Heat Atlas, Second Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá návrhom ohrevu vyhnívacej nádrže, ktorá je súčasťou procesu čistenia odpadnej vody a prebieha v nej proces vyhnívania čistiarenskeho kalu. Vyhnívanie (metanizácia) je proces, pri ktorom dochádza ku hygienizácii vstupujúceho kalu a produkcii bioplynu. V prvej časti je čitateľ uvedený do problematiky miešaných a ohrievaných priemyselných nádob. V druhej časti práce sa nachádza tepelno-hydraulický výpočet ohrevu pre prípad, kedy je nádoba miešaná aj pre prípad bez použitia miešania. V ďalšej časti práce je popísaný postup pri tvorení výpočtového nástroja, ktorý je neskôr použitý pri riešení dvoch príkladov. V poslednej časti je popísaný postup experimentálneho merania čerpacích charakteristík miešadla.

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on the design of heating of the digestion tank, which is part of the waste water purification process and where the process of sludge digestion takes place. Anaerobic digestion (methanisation) is a process main goal of which is the hygienisation of incoming sludge and related biogas production. In the first part the reader is introduced to the subject of mixed and heated industrial vessels. In the second part of the thesis thermo-hydraulic calculation of the heating process is carried out in case the vessel is agitated and in case the agitation is not applied. The next part of the thesis describes the procedure for creating a calculation tool, which is later used to solve two sample problems. The last part describes the experimental measurement of the pumping characteristics of the agitator.

KLÍČOVÉ SLOVÁ

výmena tepla, vyhnívacia nádrž, čistiarenský kal, MS EXCEL, čerpacie charakteristiky miešadla

KEY WORDS

heat transfer, anaerobic digester, sludge, MS EXCEL, pumping characteristics of the mixer

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

CUPRA, Š. *Návrh ohřevu vyhřívací nádrže*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bohuslav Kilkovský, Ph.D.

PREHLÁSENIE O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne za pomoci informačných zdrojov uvedených v zozname použitých zdrojov.

V Brně dňa 26.5.2017

.....

Bc. Šimon Cupra

POĎAKOVANIE

Týmto si dovoľujem poďakovať pánovi Ing. Bohuslavovi Kilkovskému, PhD., vedúcemu tejto diplomovej práce, za odbornú pomoc a pripomienky.

OBSAH

Abstrakt	4
Abstract	4
Kľúčové slová	4
Key Words	4
Bibliografická citácia	5
Prehlásenie o pôvodnosti práce	6
PodĎakovanie.....	7
Obsah.....	8
1 Úvod.....	10
2 Miešané nádoby.....	13
2.1 Popis miešaných nádob	13
2.2 Spôsoby ohrevu miešaných nádob.....	14
2.2.1 Ohrev použitím opláštenia nádoby.....	14
2.2.2 Ohrev použitím vnútorného ohrevného telesa	17
2.3 Spôsoby miešania miešaných nádob	19
2.3.1 Spôsoby miešania obsahu priemyselných nádob	20
2.3.2 Typy mechanických miešadiel	21
2.3.3 Charakteristiky miešadla	22
2.3.4 Výber vhodného typu miešadla.....	23
3 Tepelne-hydraulický výpočet.....	26
3.1 Termofyzikálne vlastnosti použitých médií	26
3.1.1 Termofyzikálne vlastnosti čistiarenskeho kalu	26
3.1.2 Termofyzikálne vlastnosti ohrevného média	29
3.2 Tepelne-hydraulický výpočet na vnútornej a vonkajšej strane ohrevného telesa.....	29
3.2.1 Súčiniteľ prestupu tepla na vnútornej strane ohrevného telesa	29
3.2.2 Výpočet tlakovej straty ohrevného média prechodom ohrevným hadom	31
3.3 Tepelne-hydraulický výpočet na procesnej strane.....	32
3.3.1 Výpočet súčiniteľa prestupu tepla pri voľnej konvekčii (bez použitia miešania)	32
3.3.2 Výpočet súčiniteľa prestupu tepla pri nútenej konvekčii.....	32
3.3.3 Výpočet priemernej teplota steny ohrevného hada	33
3.3.4 Výpočet celkového súčiniteľa prestupu tepla U	33
3.4 Doba ohrevu	34

3.5	Výpočet príkonu miešadla	35
4	Tvorba výpočtového nástroja	37
4.1	List VÝPOČET	37
4.2	List Priebeh teploty	42
4.3	List Rozmery trubiek	43
4.4	List Vlastnosti kalu	43
4.5	List Vlastnosti vody	44
4.6	Aplikácia výpočtového nástroja	44
4.6.1	Výpočet návrhu ohrevu surového kalu	45
5	Experimentálne meranie čerpacích charakteristík	50
5.1	Popis experimentálneho zariadenia	50
5.2	Merania čerpacích charakteristík	53
5.3	Vyhodnotenie výsledkov	55
6	Záver	57
7	Zoznam použitých zdrojov	58
8	Zoznam použitých skratiek a symbolov	61

1 ÚVOD

Hlavným cieľom tejto práce je návrh ohrevu vyhniúvacej nádrže pomocou vnútorného ohrevného telesa (ohrevnej skrutkovice, resp. ohrevného hada). Za účelom intenzifikácie výmeny tepla je súčasťou práce aj návrh vhodného spôsobu miešania. V práci je zároveň porovnanie výsledkov ohrevu bez miešania a s miešaním.

Vo vyhniúvacej nádrži, ktorá je súčasťou technológie kalového hospodárstva ČOV (čistička odpadových vôd), prebieha proces stabilizácie čistiarenskeho kalu. Ten je suspenziou tuhých látok organického či anorganického typu v kalovej vode a bol získaný procesom úpravy odpadovej vody prichádzajúcej do ČOV. Množstvo kalu je závislé na miere znečistenia odpadnej vody a spôsobe jej úpravy.[26]

Kaly predstavujú približne 1 – 2 % objemu odpadnej vody, obsahujú však 50 až 80 % pôvodného znečistenia. Kal prevažne obsahuje netoxické organické látky (cukry, tuky, bielkoviny a podobne), je bohatý na fosfor a dusík avšak vyskytujú sa v ňom aj zvyšky rôznych mikroorganizmov vrátane patogénnych, ako napríklad vírusy (hepatitída A), baktérie (salmonela), prvoky a parazitické červy. Primárnym zdrojom patogénnych mikroorganizmov sú napr. exkrementy infikovaných ľudí a zvierat.[27][28]

Zloženie kalu a množstvo sušiny v kale je uvedené v tab. 1 a tab. 2.

Tabuľka 1 Zloženie kalu [27]

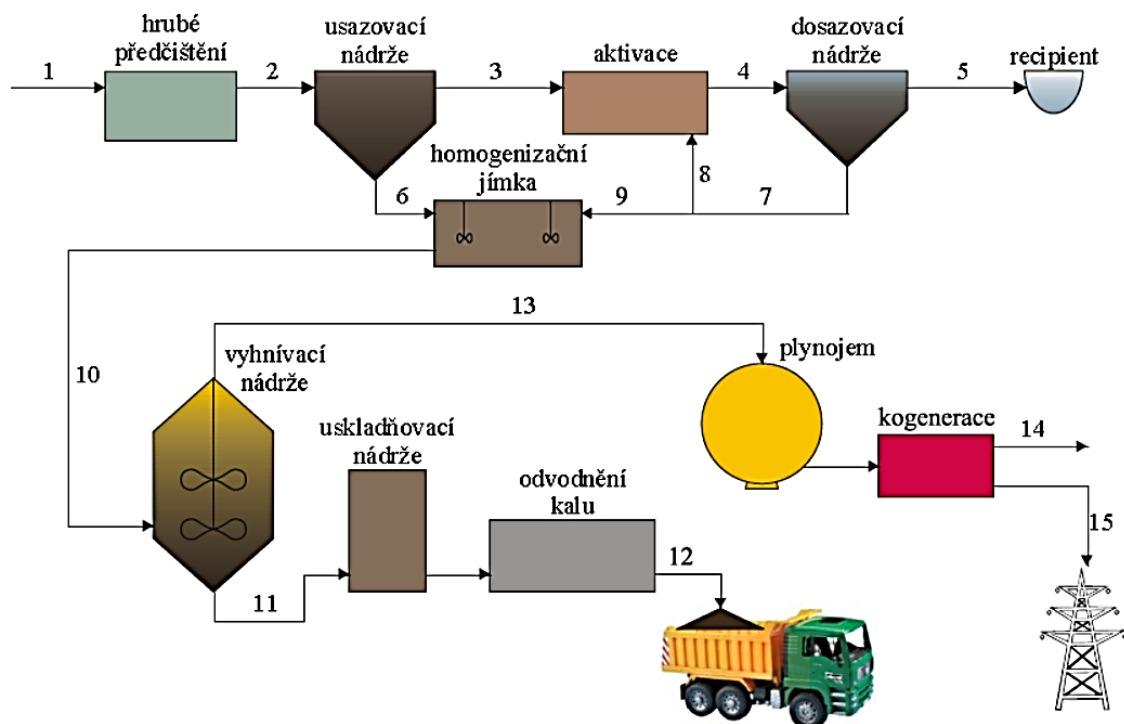
Zložka / Typ kalu	Primárny	Aktivovaný	Vyhnitý
		% zložiek	
Organická hmota	60–80	60–75	45–60
Inertné látky	20–40	25–40	40–45

Tabuľka 2 Množstvo sušiny v kale [27]

Typ kalu	% sušiny
Primárny kal	2,5–5
Aktivovaný kal	0,5–1,5

Produkcia kalu v typickej komunálnej ČOV s anaeróbnou stabilizáciou je znázornená na obrázku 1. Počas procesu čistenia odpadnej vody najprv vzniká primárny kal, ktorý sa usadzuje v primárnych usadzovacích nádržiach. Pri následnom biologickom čistení vzniká prebytočný kal (sekundárny, biologický), ktorý sa usadzuje v dosadzovacích nádržiach (sekundárne usadzovacie nádrže). Prebytočný kal zmiešaný s primárnym kalom je označený ako surový kal. Pretože v kale z ČOV prevládajú organické látky, jedná sa o tzv. hnilobný kal [30], ktorý sa musí nevyhnutne ďalej spracovať. Pri jeho skladovaní dochádza ku rozkladu obsiahnutých biologických látok a v spodných vrstvách nastávajú anaeróbne pochody za vzniku zápachajúcich a hygienicky závadných látok. Musí byť preto stabilizovaný a to aeróbne alebo anaeróbne. Obvykle je kal spracovaný anaeróbnym procesom (metanizáciou) pri vzniku bioplynu

a anaeróbne stabilizovaného (vyhnitého) kalu. Obsah vody je následne znížený prostredníctvom dekantačných odstrediviek alebo pásových lisov na cca 70 až 80 %.



Obrázok 1 Všeobecná schéma ČOV [31]

Legenda: 1-prítok surovej odpadovej vody; 2-odpadová voda zbavená veľkého mechanického znečistenia; 3-odpadová voda zbavená jemných suspendovaných častíc; 4-zmes vyčistenej vody a jemného kalu; 5-odtok vyčistenej vody z ČOV; 6-primárny kal; 7-aktivovaný kal; 8-vratný kal; 9-prebytočný aktivovaný kal; 10-zmesný surový kal; 11-vyhňutý kal; 12-odvodnený vyhňutý kal; 13-bioplyn; 14-teplo; 15-elektrická energia.

Rozdelenie čistiarenských kalov:

- **Primárny kal** – je produktom primárnej sedimentácie, tj. sedimentácie v usadzovacích nádržiach. Zloženie závisí na charaktere pritekajúcej odpadnej vody a na druhu kanalizácie, môže byť ovplyvnené aj chemickými úpravami aplikovanými pred vstupom odpadnej vody do separačného zariadenia. [31] Jedná sa o najmä o nerozpustné látky so zrnitou štruktúrou, ktoré neboli zachytené a česlách ani v lapáku piesku a vplyvom rozdielnych hustôt sa usádzajú na dne. Primárny kal obsahuje z veľkej väčšiny 2,5 až 5 hm. % sušiny. [32]
- **Aktivovaný kal (sekundárny)** – je kal z dosadzovacích nádrží. Má vložkovú štruktúru a jeho charakter je ovplyvnený typom čistiaceho zariadenia, v ktorom vznikol. Delí sa na vratný kal (časť kalu, ktorá sa vracia na opätovné čistenie) a prebytočný aktivovaný kal (časť kalu, ktorá sa ďalej spracováva) [27] [31]
- **Chemický kal** – vzniká pri použití chemických látok na odstránenie nečistôt z odpadnej vody. [31]
- **Surový kal** – zmes primárneho a aktivovaného kalu. [27]

- **Vyhnitý kal** – vzniká po stabilizácii kalu [27]. Správne stabilizovaný kal nepáchne, je dobre odvodniteľný a z hygienického hľadiska nezávadný. Z fyzikálneho hľadiska sa jedná o tmavú amorfnú neplastickú heterogénnu zmes suspendovaných koloidných látok [33]. Za anaeróbne stabilizovaný kal môžeme považovať kal, v ktorom už neprebiehajú intenzívne biologické procesy spôsobujúce senzorické a hygienické problémy. Zvyšné organické látky sú už len veľmi ťažko a pomaly rozložiteľné. V praxi sa za dobre stabilizovaný kal považuje taký kal, v ktorom bol obsah organických látok znížený na 50 %. [33]

Stabilizačné procesy slúžia na zabezpečenie hygienickej nezávadnosti výsledného produktu. Rozlišujeme dva základné druhy stabilizácie: aeróbnú a anaeróbnú, to znamená za prítomnosti vzduchu a bez jeho prítomnosti. Medzi najpoužívanejšie typy stabilizácie patrí vápnenie, ktoré prebieha za vysokých teplôt (190 °C) alebo metanizácia (vyhnívanie). Metanizácia (anaeróbná stabilizácia) vyžaduje udržiavanie podmienok optimálnych pre rast použitých mikroorganizmov, a to hlavne z pohľadu teploty a pH. Podľa teplotného režimu rozlišujeme dva druhy metanizácie: mezofilnú (teplota kalu v rozmedzí 37 až 40 °C) a termofilnú (teplota kalu okolo 55 °C). [5] [31]

Na dosiahnutie potrebných teplôt je nutné disponovať vhodným typom ohrevu. V tejto práci je na ohrev a udržiavanie teploty navrhnuté vnútorné ohrevné teleso – trubkový had – ktorý je umiestnený vo vnútri nádrže. Kvôli intenzifikácii výmeny tepla je kal v nádrži mechanicky premiešavaný. Na ohrev a udržiavanie požadovanej teploty je tiež možné použiť externý výmenník tepla.

2 MIEŠANÉ NÁDOBY

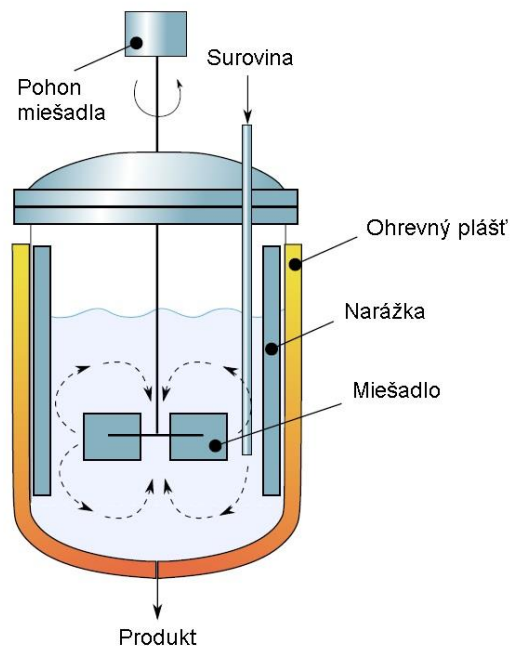
Miešané nádoby sú významné technologické zariadenia v procesnom inžinierstve, pretože viac než 50 % svetovej produkcie chemických látok s vysokou pridanou hodnotou vyžaduje ich použitie. Medzi základné oblasti použitia patrí:

- miešanie homogénnych kvapalín, ako sú mazacie oleje, palivové prísady, rozpúšťadlá a rôzne iné chemikálie,
- suspendovanie pevných častíc v kryštalizátoroch, polymerizačných reaktoroch, extrakcia rozpúšťadiel a podobne,
- miešanie a emulgácia kvapalín na hydrolýzne, resp. neutralizačné reakcie, extrakcia, suspenzná polymerizácia, výroba kozmetiky a potravín,
- dispergovanie plyných látok v kvapaline na absorpciu, stripovanie, oxidáciu, hydrogenáciu, ozonizáciu, chlôrovanie, fermentáciu a podobne,
- homogenizácia komplexných viskózných kvapalín na miešanie polymérnych látok, farieb, polymerizáciu roztokov, potravín a podobne,
- ohrev a chladenie prenosom tepla z plášťa alebo vnútorného ohrevného telesa.

Miešanie v nádobách môže prebiehať v kontinuálnom alebo dávkovacom režime. Efektivita miešania má výrazný vplyv na investičné a prevádzkové náklady, takže pre maximalizáciu zisku je potrebné zabezpečiť výborné výsledky miešania najmä optimálnym návrhom technológie a správnym nastavením procesných parametrov. Táto práca sa zaoberá ohrevom a miešaním vyhrievacej nádrže, v ďalších kapitolách budú preto popísané súvisiace technologické možnosti. [12]

2.1 Popis miešaných nádob

V miešaných nádobách môžu súčasne alebo postupne prebiehať rôzne procesy. Kľúčovým prvkom miešanej nádoby je miešadlo. To sa typicky skladá z pohonu, prevodového mechanizmu, hnacieho hriadeľa a rotoru. Rotor má zásadný vplyv na hydraulické pomery pri miešaní a môže mať v závislosti vlastnostiach miešaného média a požiadavkách miešania rôzne tvary. Na ohrev resp. chladenie obsahu sú nádoby najčastejšie vybavené ohrevným plášťom. Ten zvonku obklopuje steny nádoby a médiom prúdiacim v priestore medzi plášťom a stenou nádoby ohrieva, resp. chladí obsah nádoby. Ďalšou možnosťou je vybavenie nádoby vnútorným ohrevným telesom, najčastejšie ohrevnou špirálou. Usporiadanie typickej ohrievanej a miešanej nádoby ilustruje obrázok 2.



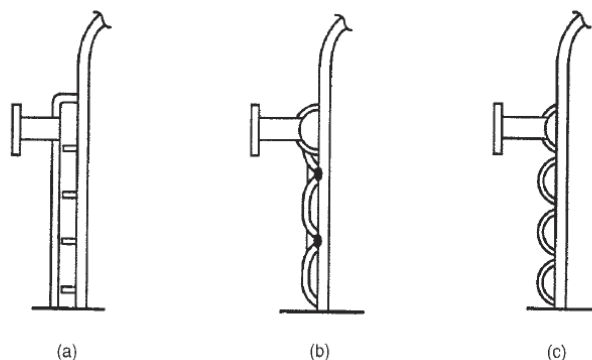
Obrázok 2 Základná schéma miešanej nádoby [20]

2.2 Spôsoby ohrevu miešaných nádob

Ohrev priemyselných nádob sa najčastejšie realizuje dvomi spôsobmi. Prvým spôsobom je použitie ohrevného plášťa, ktorý je privarený k vonkajšej stene nádoby a v priestore medzi plášťom a stenou nádoby prúdi ohrevné médium. To predáva teplo stene nádoby a tá následne ohrieva samotný obsah nádoby. Druhým spôsobom je použitie vnútorného ohrevného telesa. Tým je najčastejšie ohrevná špirála umiestnená a upevnená vo vnútri nádoby. Špirálou prúdi ohrevné médium ktoré ohrieva stenu špirály a tá následne ohrieva obsah nádoby. Ďalším často používaným spôsobom ohrevu je použitie externého výmenníku tepla. Vtedy je obsah nádoby prídavným čerpadlom prečerpávaný cez samostatne stojaci výmenník tepla, kde využitím tepla pracovného média dochádza k ohrevu.

2.2.1 Ohrev použitím opláštenia nádoby

Ohrev pomocou opláštenia je vhodný najmä v prípadoch, kedy nádoba obsahuje vysoko reaktívne resp. vysoko korozívne látky, pretože pri ohreve nedochádza ku kontaktu materiálu ohrevného telesa a obsahu nádoby. Ďalšou výhodou je znížené riziko kontaminácie obsahu nádoby ohrevným médium a tiež znížené náklady na čistenie pracovných plôch. Medzi najčastejšie používané ohrevné médiá prúdiace v opláštení patrí voda, vodná para, horúci olej a para Dowtherm™. [4] Obrázok 3 ilustruje najbežnejšie spôsoby opláštenia.

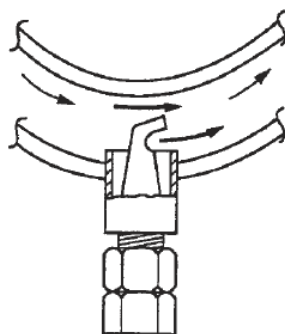


Obrázok 3 Spôsoby opláštenia nádoby:

a) konvenčný plášť so špirálovou prepážkou, b) plášť s jamkami, c) poltrubkový vinutý plášť [7]

Konvenčný plášť

Najpoužívanejší spôsob opláštenia nádoby je použitie konvenčného plášťa. Ten je tvorený valcovou nádobou, ktorá obklopuje určitú časť ohrievanej nádoby. V objeme plášťa prúdi ohrevné (alebo chladiace) médium, ktoré predáva teplo stene nádoby a tým ohrieva obsah nádoby. Do objemu plášťa je vhodné umiestniť prepážky tvoriace špirálu, ktoré zvýšením rýchlosti prúdenia ohrevného média zvyšujú hodnotu súčiniteľa prestupu tepla a tým celkovo zvyšujú prestup tepla. [7] Zvýšenie prestupu tepla možno doceliť tiež privádzaním média cez súbor miešacích trysiek (obrázok 4) rozmiestnených vo viacerých úrovniach plášťa. Tieto médium privádzajú s vysokou rýchlosťou horizontálne a tangenciálne k plášťu, čím médium v plášti urýchľujú prúdením po špirále k výstupu z plášťa. [4] Vzdialenosť plášťa od nádoby závisí najmä na veľkosti nádoby, typicky sa pohybuje v rozmedzí 50 mm pre malé nádoby až do 300 mm pre väčšie nádoby. [7] Médium v konvenčnom plášti je obvykle para, toto riešenie sa využíva najmä v situáciách, kedy nie sú na súčiniteľ prestupu tepla kladené vysoké nároky. [4]



Obrázok 4 Schéma miešacej trysky

Plášť s jamkami

Plášť s jamkami je podobný konvenčnému, avšak je vyrobený z tenšieho materiálu a zosilnený pravidelne vylisovanými jamkami, ktoré sú privarené ku stene nádoby.[7] Toto riešenie je žiadané najmä pri ohreve väčších nádob, kedy dochádza ku zníženiu celkovej hmotnosti alebo v prípadoch ohrevu stredných a väčších nádob vyrobených z nerezovej oceli prípadne iných drahých materiálov, kedy je dosiahnutá úspora celkových nákladov na materiál. Plášť s jamkami je najčastejšie použitý na kondenzačný ohrev, použitím vhodne orientovaných prepážok dobré výsledky dosahujú i kvapalné médiá. [4]



Obrázok 5 Plášť s jamkami [18]

Vinutý plášť

Vinutý plášť je najčastejšie skonštruovaný privarením trubkových sekcií s polovičným profilom ku stene nádoby. Sekcie okolo nádoby vytvárajú špirálu, ktorej parametre závisia na veľkosti požadovanej teplovýmennej plochy. Použité sú trubky normalizovaných rozmerov obvykle od 60 do 120 mm. Poltrubkový vinutý plášť je silná konštrukcia dobre odolávajúca vysokým tlakom prúdiacich médií, preto je vhodná na použitie s vodnou parou.[7]

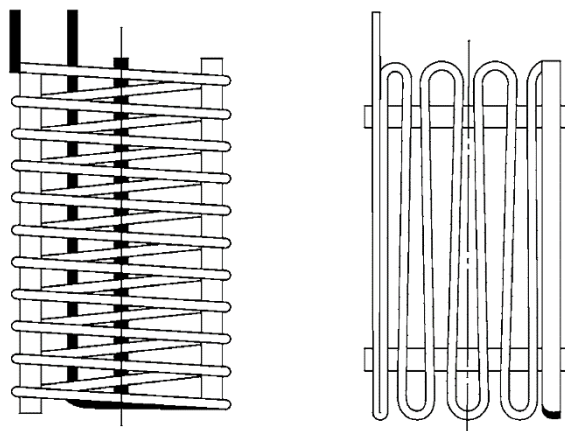


Obrázok 6 Poltrubkový vinutý plášť [18]

2.2.2 Ohrev použitím vnútorného ohrevného telesa

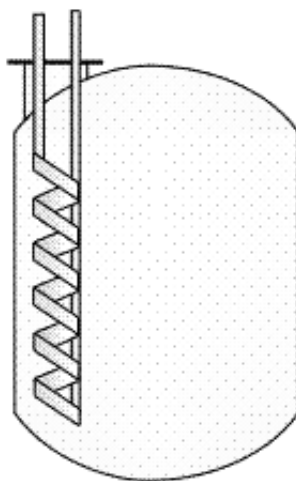
Najčastejšie sa ohrev vnútorným ohrevným telesom realizuje použitím ohrevnej špirály. Tá je umiestnená vo vnútri nádoby a prichádza do priameho kontaktu s obsahom nádoby. V porovnaní s opláštením toto riešenie dosahuje omnoho väčšiu teplovýmennú plochu na jednotku objemu nádoby, z čoho vyplýva i zvýšenie súčiniteľa prestupu tepla. Dôležité je však príliš malým stúpaním skrutkovice nevytvoriť v nádobe falošnú stenu, ktorá negatívne ovplyvňuje ďalšie procesy. Ohrevná špirála oproti plášťu potrebuje na ohrev menší prietok pracovného média. Napriek veľmi dobrému prestupu tepla sa však doporučuje miešaním uviesť obsah nádoby do pohybu. V opačnom prípade výmena tepla závisí na prirodzenej konvekcii v obsahu nádoby, čo nie je veľmi efektívne riešenie. [14]

Na obrázku 7 vľavo je základný návrh ohrevnej špirály. Ohrevné médium je privedené do dolnej časti a postupom smerom nahor odovzdáva teplo obsahu nádoby. V prípade použitia jednoduchého listového rotoru miešadla vzniká centrálny vír, ktorý z pohľadu prenosu hmoty nie je výhodný, preto sú do nádoby umiestnené narážky, ktoré zároveň slúžia k upevneniu špirály v nádobe a spôsobujú zmenu prúdenia kvapaliny z tangenciálneho na radiálny. [19] Návrh na obrázku vpravo sa označuje ako meandrová špirála. Takéto riešenie má pozitívny vplyv pri eliminácii vzniku centrálného víru. [2]



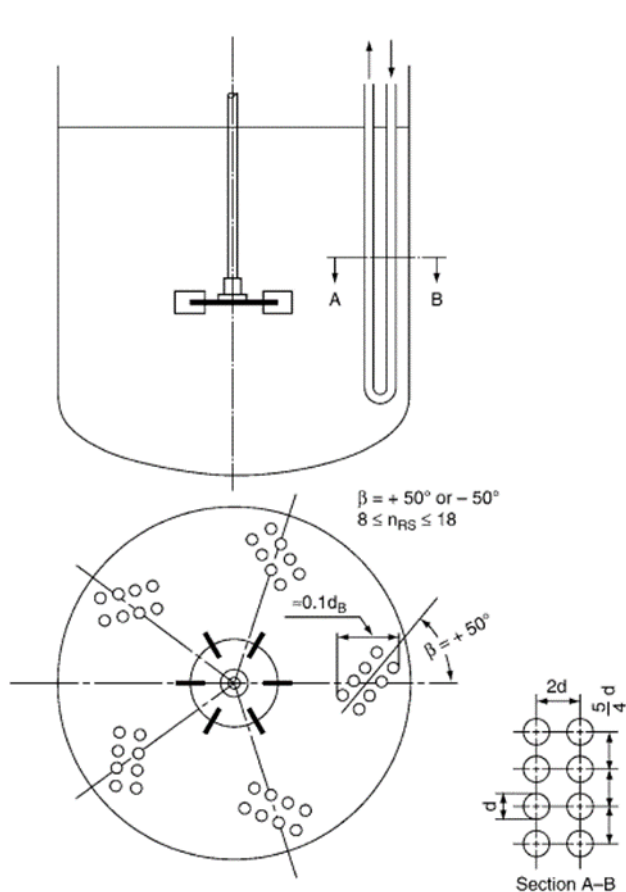
Obrázok 7 Základná a meandrová ohrevná skrutkovica [2]

Na obrázku 8 je znázornená prstencová ohrevná skrutkovica. Toto riešenie je navrhnuté s dôrazom na jednoduchšiu demontáž. Oproti plnej skrutkovici, ktorá vyžaduje, aby bola nádoba dvojdielna s hlavným prírubovým spojom veka a nádoby, prstencová skrutkovica je do nádoby vkladaná cez menší vstupný otvor. Nevýhodou však je riziko výskytu stagnujúcich oblastí pri miešaní kvapaliny. [14]

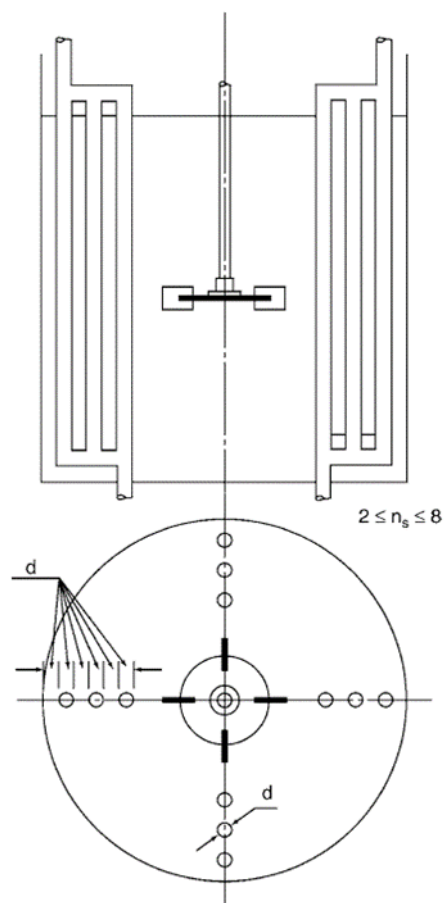


Obrázok 8 Prstencová ohrevná skrutkovica [14]

Na obrázkoch 9 a 10 sú znázornené vertikálne trubkové narážky. Technické riešenie spájajúce funkciu ohrevného telesa a miešacích narážok.



Obrázok 9 Viacchodové trubkové narážky [2]



Obrázok 10 Jednochodové trubkové narážky [2]

2.3 Spôsoby miešania miešaných nádob

Účelom miešania je homogenizácia zmesi, ktorá sa prejaví znížením koncentračného a tepelného gradientu, prípadne oboch súčasne. Distribúcia častíc jednotlivých komponentov zmesi je v počiatočnej fáze náhodná, je ovplyvnená gravitačnými silami, segregáciou alebo sedimentáciou. Dokonale premiešanou zmesou môžeme nazvať zmes, ktorá v ľubovoľnom mieste vykazuje identické zloženie a teplotu.

Miešaná zmes môže byť tvorená tekutinou (kvapalinou resp. plynom) alebo sypkou látkou. Táto práca sa zaoberá miešaním čistiarenského kalu, čo je viskózna kvapalná látka. Z pohľadu miešania je kvapaliny vhodné rozdeliť na kvapaliny newtonovské (pri laminárnom prúdení je závislosť medzi šmykovým napätím a šmykovou rýchlosťou lineárna), ktorých hlavným predstaviteľom je voda, a kvapaliny ne-Newtonovské, ktorými sú typicky pasty resp. cestovité hmoty a tiež čistiarenský kal.

Základným predpokladom miešania je pohyb miešaných častíc. Ten môže pri tekutinách nastať dvomi spôsobmi a to samovoľne alebo nútene.

Samovoľné miešanie je spôsobené pohybom častíc v dôsledku molekulárnej difúzie (spôsobenej koncentračným spádom) resp. voľnej konvekcie (ktorá je spôsobená nerovnomernou distribúciou hustoty). Za normálnej teploty a tlaku prevláda vplyv molekulárnej difúzie. V technickej praxi nemá samovoľné miešanie veľký význam pretože prebieha príliš pomaly.

Na dosiahnutie rýchlejšieho premiešania je potrebné vyvolať prenos hmoty alebo tepla nútenou konvekciou, tzn. prúdením. Na miešanie má zásadný vplyv charakter prúdenia, ktorý je závislý na rýchlosti prúdenia, kinematickej viskozite kvapaliny a na geometrickom usporiadaní priestoru, ktorým tekutina prúdi.[3]

Rozlišujeme dva základné typy prúdenia: laminárne a turbulentné.

1. **Laminárne prúdenie** je charakterizované pohybom častíc kvapaliny v hladkých, navzájom súbežných vrstvách. Pri takto usporiadanom prúdení nedochádza ku nepravidelným zmenám veľkosti ani smeru miestnej okamžitej rýchlosti. Pretože sú tieto vrstvy súbežné, nedochádza medzi nimi k prenosu mikročastíc ale prebieha iba molekulárna difúzia, ktorá však prebieha aj keď je kvapalina nehybná. Elementárne častice tekutiny neprestupujú z jednej vrstvy do druhej, len sa posúvajú v smere prúdenia a nenarážajú do seba. Takýto prenos hmoty je veľmi pomalý a tvorí odpor voči prenosovým javom. Laminárne prúdenie je stabilné pokiaľ účinky zotrvačných síl prevyšujú účinky trecích síl v kvapaline.[19]
2. **Turbulentné prúdenie** je charakterizované náhodnosťou, tzn., že sa smer a veľkosť miestnej okamžitej rýchlosti nepravidelne mení a pohyb častíc je úplne náhodný, dochádza k turbulencii. Výmena hmoty a hybnosti je omnoho intenzívnejšia, preto má dosiahnutie turbulencie pri miešaní kľúčový význam. Turbulentné prúdenie prebieha pri vyššej rýchlosti prúdenia, po prekročení tzv. kritickej rýchlosti toku.[3]

Najjednoduchším spôsobom premiešania tekutiny je premiešanie v priebehu dopravy vzájomne miesiteľných tekutín dopravným potrubím. Miešanie je spôsobené turbulenciou, pretože v technickej praxi prúdi tekutina potrubím spravidla za turbulentných podmienok. Tento spôsob miešania je vhodný pre kvapaliny aj plyny. K dobrému výsledku miešania napomáha dostatočná dĺžka dopravného potrubia a to najmä pre kvapaliny, ktorých miešanie prebieha pomalšie.

Omnoho častejšie než v potrubí prebieha miešanie v nádržiach. Nádrže môžu byť prietokové (nepretržitá prevádzka) alebo vsádzkové (prerušovaná prevádzka). V oboch prípadoch je však cieľom v čo najväčšom objeme vytvoriť turbulenciu a tým zabezpečiť intenzívnu výmenu hmoty i tepla. Vytvorenie turbulencie v celom objeme nádrže je veľmi náročné, preto je snaha, aby všetka kvapalina v nádrži prešla miestami so silne vyvinutou turbulenciou. To je dosiahnuté cirkuláciou kvapaliny v nádrži. Na proces miešania v nádrži majú zásadný vplyv dva parametre: **miera turbulencie** a **miera cirkulácie**, ktorá je charakterizovaná dobou potrebnou na to, aby celý obsah nádrže prešiel jedenkrát prešiel určitou zvolenou plochou (obvykle obvodovou plochou opísanou lopatkami miešadla, resp. ústím trysky)

2.3.1 Spôsoby miešania obsahu priemyselných nádob

Miešanie výtokovou tryskou

Pri výtoku tekutiny z trysky do veľkého priestoru má prúd tvar kužeľa rozširujúceho sa od ústia trysky. Je to spôsobené nasledujúcimi okolnosťami:

1. Prúd tekutiny vytekajúcej z trysky vytláča tekutinu, ktorá je pred ústím trysky v nádrži.
2. Tekutine obklopujúcej vystupujúci prúd je predaná časť jeho hybnosti a tým je strhnutá do pohybu, ktorý je s ním rovnobežný. Prevod hybnosti je spôsobený tangenciálnym napätím medzi pohybujúcou sa a nehybnou vrstvou tekutiny.
3. V mieste, z ktorého bola kvapalina strhnutá do pohybu sa na malý okamih vytvorí podtlak. Ten spôsobí, že do tohto miesta je okamžite prisatá ďalšia kvapalina, ktorá je potom opätovne strhnutá do pohybu vystupujúcim prúdom z trysky. Tento cyklus sa stále opakuje.

Prisávaním a strhovaním tekutiny do pohybu vystupujúcim prúdom vzniká na okrajoch kužeľa turbulentná hraničná vrstva. Touto turbulenciou dochádza k samotnému miešaniu. Miešanie tryskou sa používa pre plyny aj kvapaliny, princíp zostáva rovnaký. Tryska sa obvykle používa v spojení s čerpadlom, ktoré odčerpáva kvapalinu z nádrže a potrubím zakončeným tryskou ju potom dopravuje naspäť do nádrže. [3]

Miešanie kvapalín plynom

Pri miešaní kvapalín plynom (najčastejšie vzduchom, vo vyhniavacích nádržiach sa používa vyprodukovaný bioplyn) je plyn do kvapaliny uvedený pri dne nádrže a vniká do nej vo forme bublín. Pretože sú bubliny plynu ľahšie ako kvapalina, stúpajú a k hladine vynášajú kvapalinu v bezprostrednom okolí svojho povrchu. S rastúcou rýchlosťou stúpania vzniká za bublinou vírenie. Pri intenzívnom prebublávaní je kvapalina bublinami vynášaná v takej miere, že s nimi prúdi od dna ku hladine a po

úniku plynu pri hladine sa zasa vracia ku dnu. Popísaným procesom teda vzniká turbulencia a tiež cirkulácia potrebná na spustenie miešania. [3]

Použitie mechanických miešadiel

Mechanické miešadlá sa takmer výlučne používajú na miešanie kvapalín. V nádrži vytvárajú prúdenie ktorým sa dosiahne premiešanie obsahu. Väčšinou sú to miešadla s rotujúcim pohybom. Miešadlo odovzdáva časť svojej hybnosti kvapaline a vyvoláva v nej pohyb. Podľa spôsobu akým je hybnosť odovzdaná rozlišujeme dva druhy zariadení:

1. Miešadlo odovzdáva hybnosť prostredníctvom tangenciálneho napätia, tzn. kolmo na smer pohybu miešadla. Príkladom je kotúčové miešadlo. Kvapalina priľne k jeho povrchu a akonáhle sa začne miešadlo otáčať, dôjde aj k rotácii priľnutej vrstvy kvapaliny. Pôsobením viskozity sa od tejto vrstvy do pohybu privádzajú aj ďalšie, susedné vrstvy kvapaliny, až nakoniec nastane prúdenie v celom objeme nádrže.
2. Prevod hybnosti nastáva tlakom lopatiek miešadla na kvapalinu a deje sa teda v smere pohybu miešadla. Tento spôsob je najdôležitejší a najrozšírenejší prípad miešania kvapalín. Do tejto skupiny patria napríklad lopatkové, turbínové či vrtuľové miešadlá. Lopatky miešadla pri otáčaní vyvodzujú na kvapalinu pred sebou tlak, čím ju uvádzajú do pohybu. Tesne za lopatkou vzniká podtlak, ktorý spôsobuje prisávanie kvapaliny z okolia. Vytláčaním a prisávaním kvapalina vzniká o kolo lopatiek turbulentné vírenie. S narastajúcim počtom otáčok miešadla začína na kvapalinu v priestore medzi lopatkami pôsobiť ešte odstredivá sila. Tým sa zväčšuje výtok kvapaliny z obvodu miešadla do okolia a zvyšuje i prisávanie kvapaliny v jeho strede.

Táto práca sa zaoberá mechanickým miešaním suspenzie – čistiarenskeho kalu, preto bude tento spôsob miešania bližšie popísaný v nasledujúcej kapitole.

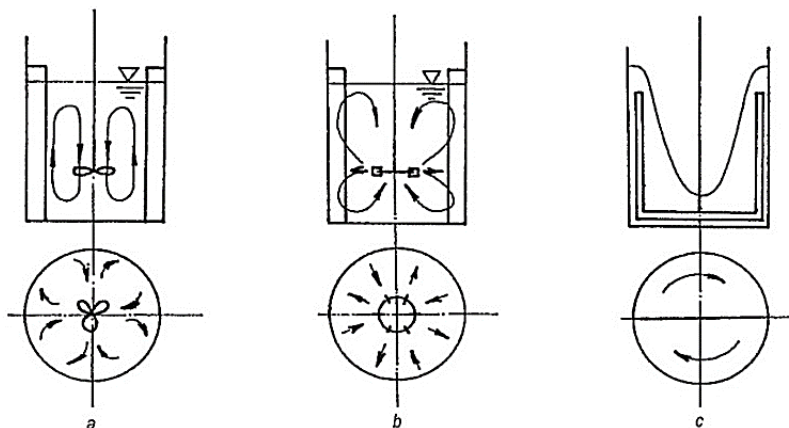
2.3.2 Typy mechanických miešadiel

Mechanické miešadlá je možné klasifikovať podľa rôznych kritérií.

Podľa prevládajúceho pohybu kvapaliny, ktorý miešadlo vyvoláva, môžeme prúdenie v nádrži pri miešaní rozdeliť na:

- *Axiálne prúdenie* (obrázok 11 a): kvapalina do miešadla prichádza aj odchádza v smere rovnobežnom s jeho osou. Podľa smeru otáčania miešadla rozlišujeme dva prípady vertikálneho miešadla s axiálnym tokom:
 - a) miešadlo prisáva kvapalinu smerom od dna v vytláča ju ku hladine nádrže,
 - b) miešadlo prisáva kvapalinu smerom z hladiny a vytláča ju ku dnu nádrže.[19]
- *Radiálne prúdenie* (obrázok 11 b): kvapalina prúdi z miešadla kolmo k osi miešadla. Viskozita kvapaliny kladie prúdeniu odpor, na ktorého prekonanie je potrebné miešadlom vyvinúť dostatočne veľké odstredivé sily. Akonáhle odstredivé sily prevážia nad odporom prostredia, nastáva radiálne prúdenie miešadla do okolia. [19]

- *Tangenciálne prúdenie* (obrázok 11 c): kvapalina v nádrži prúdi rovnobežne s dráhou, ktorú opisuje miešadlo. Výtok prúdu kvapaliny z miešadla do okolia a jej prisávanie do miešadla je malé. Prienik vo vertikálnom smere je minimálny. Miešanie je spôsobené iba vírením v okolí obvodu lopatiek. Najmenší je účinok miešania v medznom prípade, kedy sa rýchlosť otáčania kvapaliny rovná rýchlosti otáčania miešadla. [19]



Obrázok 11 Prúdenie kvapaliny pri miešaní [19]
a – axiálne, b – radiálne, c - tangenciálne

Podľa frekvencie otáčania môžeme miešadlá rozdeliť do dvoch skupín:

- Miešadlá rýchlobežné:
 - používajú sa na miešanie nízko viskózných kvapalín,
 - majú pomerne malé funkčné plochy umiestnené blízko osy otáčania,
 - ich priemer je väčšinou menší ako tretina priemeru nádoby,
 - výhodou je možnosť použitia priameho pohonu elektromotorom s vylúčením drahej prevodovky,
 - väčšinou sa jedná o miešadlá vyvodzujúce axiálne alebo radiálne prúdenie kvapaliny. [19]
- Miešadlá pomalybežné:
 - používajú sa na miešanie vysokoviskózných kvapalín,
 - väčšinou sa jedná o miešadlá vyvodzujúce tangenciálne prúdenie v nádobe bez narážok,
 - pracujú s menšími frekvenciami otáčania a je pre ne typické, že ich relatívne väčšie funkčné plochy sú umiestnené na veľkom polomere otáčania, niekedy až tesne pri stene nádoby. [19]

2.3.3 Charakteristiky miešadla

Charakteristiky miešadla sú dôležité pri posudzovaní vhodnosti miešadla pre konkrétnu aplikáciu. Dvomi základnými charakteristikami miešadla sú hydrodynamická výška a čerpací účinok.

Hydrodynamická výška H

Energetickú charakteristiku prúdu odchádzajúceho z miešadla poskytuje Bernoulliho rovnica. Pretože funkcia mechanického miešadla je do určitej miery podobná funkcii

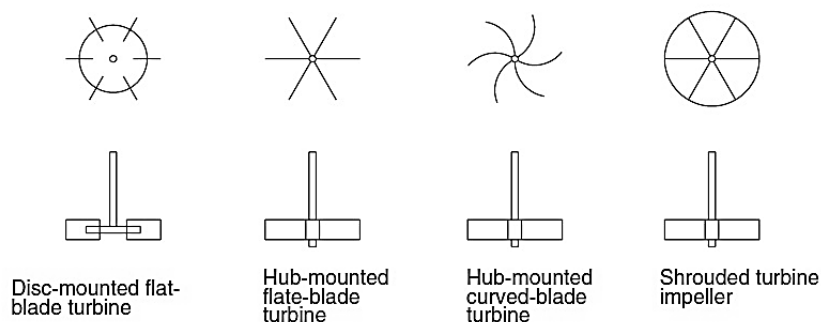
čerpadla, môžeme si pre tento prípad predstavovať celkovú hydrodynamickú výšku (tj. súčet jednotlivých výšok v Bernoulliho rovnici) ako výtlačnú výšku čerpadla. Tá sa pri miešaní spotrebuje na pohyb kvapaliny, vytvorenie turbulencie a prekonanie odporu prostredia. Pretože je intenzita turbulencie úmerná výške H , stáva sa hydrodynamická výška veľmi dôležitou pre posúdenie účinku miešadla. Jej priame určenie je však náročné, získava sa preto nepriamo výpočtom.[3]

Čerpací účinok Q

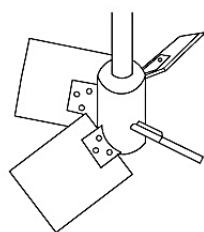
Druhou charakteristickou veličinou miešadla je objem kvapaliny pretekajúcej miešadlom za jednotku času. Tento objem sa nazýva čerpací účinok Q . Udáva mieru cirkulácie kvapaliny v nádrži a je závislý na otáčkach a geometrii miešadla. Ak objem nádrže vydělíme čerpacím účinkom, zistíme dobu potrebnú na to, aby všetka kvapalina v nádrži práve raz prešla miešadlom. [3]

2.3.4 Výber vhodného typu miešadla

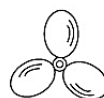
Pri voľbe miešadla je na výber z veľkého množstva možností. Voľba efektívneho riešenia pre konkrétnu aplikáciu sa riadi požiadavkami procesu, kapacitou nádoby a vlastnosťami miešanej zmesi (hlavne viskozitou). Turbínové miešadlá (obr. 12) sú vhodné pre zmesi nižšej až strednej viskozity, pre zmesi vysokej viskozity sú vhodné miešadlá ako napríklad kotvové alebo listové (obr. 13). V súčasnej dobe je vývoj zameraný na tzv. krídlové miešadlá, ktorých lopatky majú krídlový profil a poskytujú efektívnejšie a lepšie usmernené čerpanie. Mnohé špecifické procesy vyžadujú vývoj špecifických miešadiel.[12]



(a)

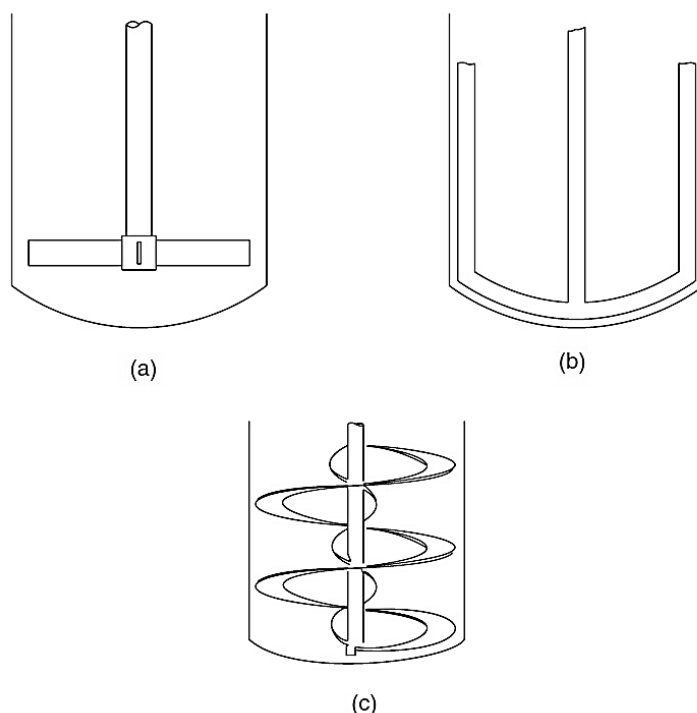


(b)



(c)

Obrázok 12 Rýchlobežné miešadlá:
a) turbínové s kolmými lopatkami; b) turbínové so sklonenými lopatkami; c) vrtuľové. [7]

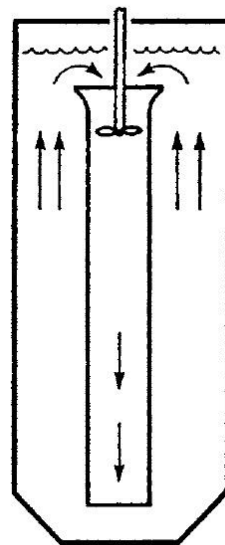


Obrázok 13 Pomalobežné miešadlá:
a) pádlové; b) kotvové; c) skrutkové so stuhou. [7]

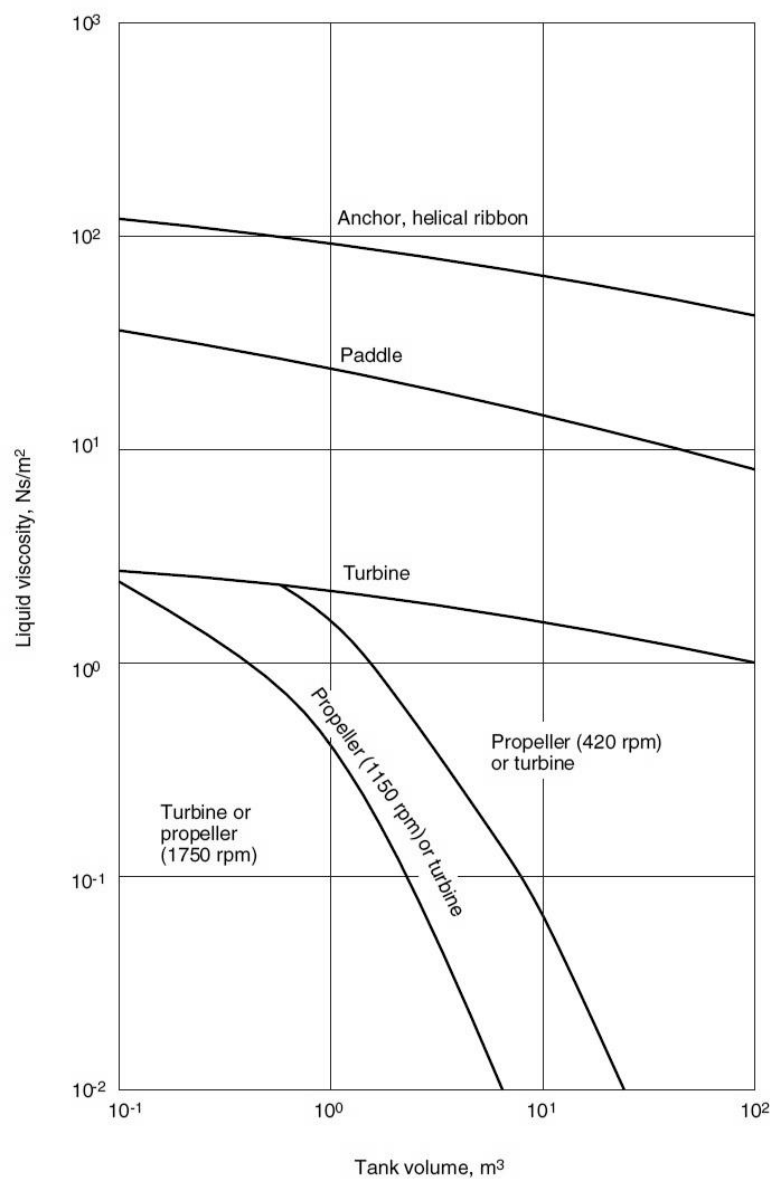
Predbežný výber miešadla na základe kapacity nádrže a viskozity zmesi je možné vykonať pomocou grafu na obrázku 14. Z údajov o viskozite kalu poskytnutých pani Ing. Houdkovou vyplýva, že pre strednú teplotu kalu (30 °C) jeho viskozita neprekročí hodnotu 10^{-2} Ns/m^2 . Zároveň je známe, že objem vyhnívacej nádrže niekoľko násobne prekročí hodnotu 10^2 m^3 , preto do úvahy prichádza oblasť grafu v jeho dolnom pravom rohu, tzn. miešadlo turbínového resp. vrtuľového typu s doporučenou rýchlosťou 420 otáčok/minútu. [7]

Vzhľadom na značné rozmery vyhnívacej nádrže sa doporučuje použitie savky (obrázok 15). Savka (nasávacia trubka) je umiestnená v osi nádrže a axiálne miešadlo v nej umiestnené zabezpečuje efektívnu cirkuláciu zmesi z hornej do dolnej časti nádrže, resp. obrátene. Použitie savky spôsobuje zníženie odchýlok procesných parametrov (koncentrácia, hustota, viskozita). [12]

Vzhľadom na vyššie uvedené bude pre aplikáciu vo vyhnívacej nádrži uvažované miešadlo so savkou vyvodzujúce axiálne prúdenie a to konkrétne vrtuľové miešadlo a miešadlo turbínové so sklonenými lopatkami.



Obrázok 14 Savka [11]



Obrázok 15 Graf použitý pri predbežnom výbere typu miešadla [7]

3 TEPELNE-HYDRAULICKÝ VÝPOČET

Tepelne hydraulický výpočet nádoby sa skladá z nasledujúcich krokov:

- 1) definovanie termofyzikálnych vlastností použitých médií,
- 2) tepelne hydraulický výpočet vo vnútri a na vonkajšej strane ohrevného hada,
- 3) výpočet doby ohrevu,
- 4) výpočet príkonu miešadla.

3.1 Termofyzikálne vlastnosti použitých médií

V prípade ohrevu vyhnívacej nádrže je k dispozícii čistiarenský kal a voda.

3.1.1 Termofyzikálne vlastnosti čistiarenského kalu

Zloženie čistiarenského kalu

Kaly z mestských ČOV obsahujú priemerne 0,5 až 7 % sušiny, ktorá sa skladá zo 60 – 70 % organických látok a 30 – 40 % anorganických látok. Pevná fáza kalu obsahuje približne 80% suspendovaných častíc o veľkosti zrna nad 0,1 mm a asi 20 % častíc o veľkosti zrna pod 0,1 mm, údaje o priemernom množstve a zložení kalu sa od seba výrazne líšia v závislosti na miestnych podmienkach. Väčšina častíc kalu má koloidný charakter alebo blízky veľkosti koloidov. Jednotlivé častice majú veľkú povrchovú plochu. Navyše organická hmota sušiny má obvykle kapilárny tvar povrchu a drží sa v nej veľké množstvo vody, čo zhoršuje odvodňovanie kalu prostou sedimentáciou a spôsobuje zanášanie filtračných plachiet. Kal je zložený zo suspenzie pevných látok a agregovaných koloidných látok pôvodne obsiahnutých v odpadnej vode. Obsah sušiny (v % hm.) kalu (tabuľka 3) vyjadruje koncentráciu kalu, ktorého zloženie a obsah závisí na charaktere znečistenia odpadných vôd a na procesoch čistenia, ktorými odpadná voda prešla (mechanické čistenie, biologické čistenie alebo ich kombinácia, fyzikálno-chemické čistenie alebo dočistenie, a podobne). [22]

Tabuľka 3 Obsah sušiny v kale [27]

Typ kalu	% hm. sušiny
Primárny kal	2.5 – 5
Aktivovaný kal	0.5 – 1.5
Gravitačne zahustený prebytočný aktivovaný kal	2 – 6
Zmiešaný surový kal	4 – 6
Stabilizovaný kal	3 – 5
Odvodnený kal	20 – 40

Množstvo likvidovaného kalu je tiež ovplyvnené jeho technologickým spracovaním (zahusťovanie, dezintegrácia, stabilizácia, odvodňovanie, dezinfekcia, sušenie, a podobne) a hlavne pôsobením rôznych chemických činidiel pridávaných do procesu

čistenia vôd a spracovania kalov (soli železa a hliníku, vápno, polymérne látky a podobne). [22]

Hustota čistiarenskeho kalu

Ukázalo sa, že hustota kalu v podstate závisí na druhu kalu, obsahu sušiny v kale a jeho teplote. Odlišnosti medzi hustotou rôznych typov kalov sú výrazné najmä pri vyšších teplotách. Všeobecne je možné skonštatovať, že z počiatku meraného teplotného intervalu 10 – 50°C je hustota všetkých kalov vyššia ako hustota vody a so zvyšujúcou sa teplotou viac alebo menej výrazne klesá. [23] [25]

Viskozita čistiarenskeho kalu

Od určitej hodnoty obsahu sušiny (približne 2 hm. %) sa čistiarenský kal chová ako nenenewtonovská kvapalina, to znamená závislosť medzi šmykovým napätím τ a šmykovou rýchlosťou $\dot{\gamma}$ je nelineárna. Z toho dôvodu nie je možné pri návrhu procesných zariadení pracujúcich s kalmi pre zjednodušenie používať vlastnosti vody ako newtonovskej kvapaliny. Viskozita nenenewtonovských kvapalín sa neurčuje ako látková konštanta ale je potrebné ju pre konkrétnu látku zistiť experimentálne a z nameraných dát určiť tzv. zdanlivú viskozitu. Experimentálne dáta je vhodné spracovať do tzv. reogramov (obrázok 17), ktoré znázorňujú závislosť šmykového napätia na smykovej rýchlosti. Zdanlivá viskozita je potom definovaná nasledovne (1):

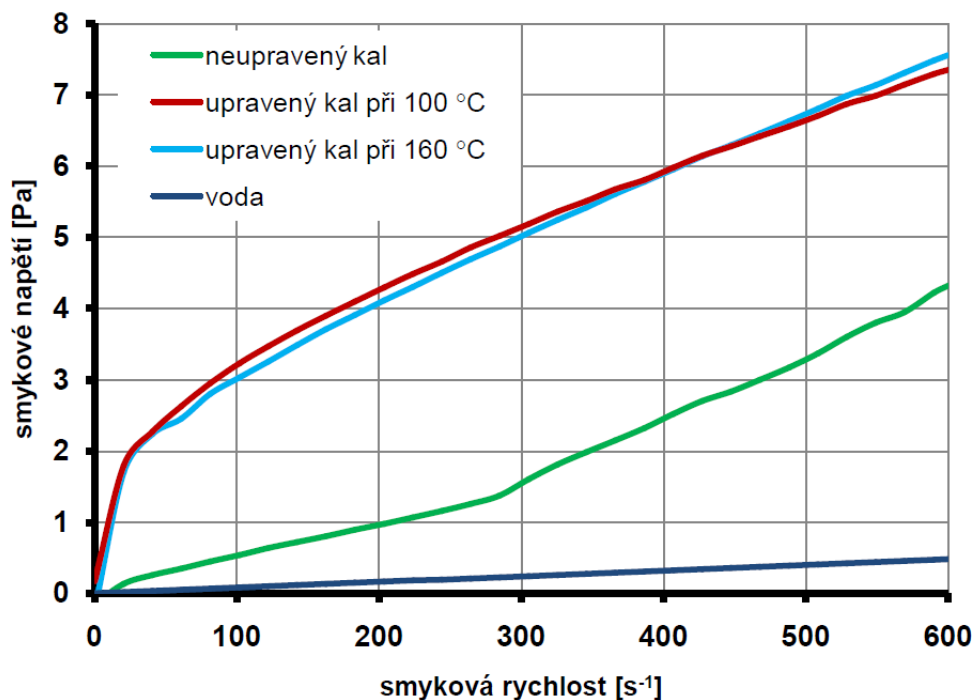
$$\eta_z = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

kde: η_z je zdanlivá viskozita [Pa.s],

τ je šmykové napätie [Pa],

$\dot{\gamma}$ je šmyková rýchlosť [s⁻¹].

Viskozita upraveného kalu pri teplote 160 °C je omnoho nižšia ako viskozita kalu neupraveného pri 30 °C. V intervale šmykovej rýchlosti 0 – 600 s⁻¹ je pomer týchto viskozít 1/5. Minimálny pomer viskozít je 1/9 pri šmykovej rýchlosti okolo 40 s⁻¹ a tento pomer rastie so zvyšujúcou sa šmykovou rýchlosťou až do jeho maxima 1/2 pri šmykovej rýchlosti 600 s⁻¹. [19]



Obrázok 16 Reogramy čistiarenských kalov a vody získaných pri 30 °C [24]

Podľa [21] je možné korelácie prestupu tepla v Newtonovských kvapalinách použiť aj pre ne-Newtonovské kvapaliny, pokiaľ bude viskozita η Newtonovskej kvapaliny vystupujúca vo výpočte Reynoldsovho čísla, Prandtlovho čísla a pomeru viskozít nahradená zdanlivou viskozitou η_z .

Na určenie zdanlivej viskozity obsahu v nádobe je potrebné zistiť aktuálnu šmykovú rýchlosť. Podľa [21] existuje lineárna závislosť medzi šmykovou rýchlosťou a rýchlosťou obežného kola miešadla v tvare (2):

$$\dot{\gamma} = k_s n \quad (2)$$

kde k_s [-] predstavuje konštantu úmernosti a n [s⁻¹] otáčky miešadla.

Problematické je určenie konštanty úmernosti. Konštanty úmernosti najpoužívanějších miešadiel pre newtonovské aj nenewtonovské kvapaliny sú v tabuľke 4, ostatné miešadlá je možné nájsť v [21], pre použité miešacie čerpadlo AMV400 sa konštanta nájsť nepodarila.

Tabuľka 4 Konštanty úmernosti pre vybrané typy miešadiel [2] [14]

Typ rotoru	k_s (newtonovské kvapaliny)	k_s (pseudoplastické kvapaliny)	k_s (dilatantné kvapaliny)
Vrtuľový	10	11	$22s^2/(s^2-1)^{(1)}$
Turbínový	11.5	11	$22s^2/(s^2-1)^{(1)}$
Turbínový so sklonenými lopatkami	13	11	$22s^2/(s^2-1)^{(1)}$
Kotvový	25	$9,5+9s^2/(s^2-1)^{(1)}$	-
Skrutkový so stuhou	30	4π	-
EKATO Intermig (0,8 D_T)	40	-	-

⁽¹⁾ $s = d_B/d_R$.

3.1.2 Termofyzikálne vlastnosti ohrevného média

Ako ohrevné médium je možné použiť paru, vodu, prípadne samotný kal. Voľba závisí na technologických možnostiach prevádzky. V tejto práci je ako ohrevné médium uvažovaná voda, ktorej vlastnosti sú všeobecne známe a ľahko prístupné, resp. kal, ktorého vlastnosti sú uvedené v predchádzajúcej kapitole.

3.2 Tepelne-hydraulický výpočet na vnútornej a vonkajšej strane ohrevného telesa

Tepelne-hydraulický výpočet na vnútornej a vonkajšej strane ohrevného telesa pozostáva z výpočtu súčiniteľa prestupu tepla na vnútornej a vonkajšej strane ohrevného telesa, výpočtu celkového súčiniteľa prestupu tepla a výpočtu tlakovej straty ohrevného média.

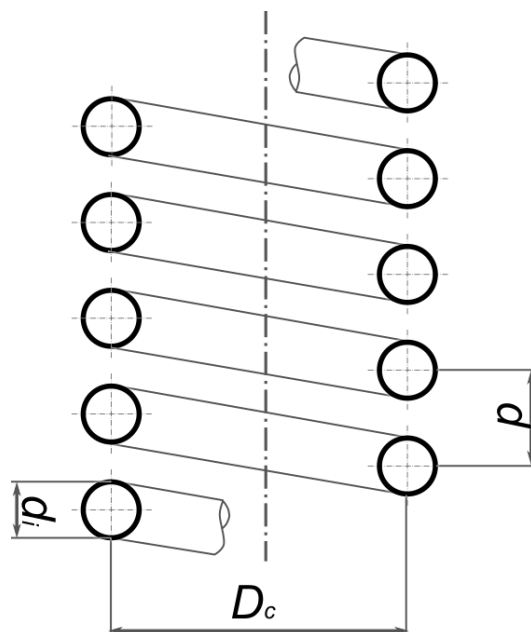
3.2.1 Súčiniteľ prestupu tepla na vnútornej strane ohrevného telesa

Odstredivé sily, vznikajúce pri prúdení kvapaliny špirálou, spôsobujú vznik sekundárneho prúdenia smerujúceho od stien špirály k jadru prúdenia a tým podporujú vznik symetrického vírivého prúdenia. Vďaka tomu je maximálna rýchlosť prúdenia dosiahnutá mimo osi špirály. Sekundárne prúdenie spôsobuje prenos hmoty priečne po priereze trubky, dochádza ku prídavnej výmene tepla konvekciou, čím je zvýšený celkový prenos tepla v špirále. S nárastom výmeny tepla je však spojený i nárast tlakovej straty v porovnaní s prúdením v rovnej trubke. Rozdiely sú najvýraznejšie v laminárnej oblasti prúdenia.[2]

Podľa [8] je možné koeficient prestupu tepla na vnútornej strane špirály získať podľa nasledujúceho vzťahu a to vynásobením koeficientu prestupu tepla na vnútornej strane rovnej trubky hodnotou podľa vzťahu (3), kde d_i je vnútorný priemer trubky a D_C je stredný priemer skrutkovice:

$$\alpha_{\text{špirála}} = \alpha_{\text{rovná trubka}} \cdot \left(1 + 3,5 \cdot \left(\frac{d_i}{D_c} \right) \right) \quad (3)$$

Geometrické parametre sú znázornené na obrázku 18.



Obrázok 17 Geometrické parametre špirály [2]

Podľa [1] je na výpočet Nusseltovho čísla a následne súčiniteľa výmeny tepla možné použiť nasledujúce vzťahy:

a. Laminárne prúdenie ($Re < Re_{crit}$)

$$Nu_l = 3,66 + 0,08 \left[1 + 0,8 \cdot \left(\frac{d_i}{D} \right)^{0,9} \right] Re^m Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,14} \quad (4)$$

$$m = 0,5 + 0,2903 \left(\frac{d_i}{D} \right)^{0,194} \quad (5)$$

b. Turbulentné prúdenie ($Re > 22\,000$)

$$Nu_t = \frac{(\xi/8) Re Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\xi/8} (Pr^{2/3} - 1)} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,14} \quad (6)$$

$$\xi = \left[\frac{0,3164}{Re^{0,25}} + 0,03 \left(\frac{d_i}{D} \right)^{0,5} \right] \left(\frac{\eta_w}{\eta} \right)^{0,27} \quad (7)$$

c. Prúdenie v prechodnej oblasti ($Re_{crit} < Re < 22\,000$)

$$Nu = \gamma Nu_l(Re = Re_{crit}) + (1 - \gamma) Nu_t(Re = 22\,000) \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{22\,000 - Re}{22\,000 - Re_{crit}} \quad (9)$$

Kritické Reynoldsovo číslo Re_{crit} je určené vzťahom:

$$Re_{crit} = 2300 \left[1 + 8,6 \cdot \left(\frac{d_i}{D} \right)^{0,45} \right] \quad (10)$$

Pre výpočet súčiniteľa prestupu tepla α_h potom platí:

$$\alpha_h = \frac{Nu_h \cdot \lambda}{d_i} \quad (11)$$

Potrebné geometrické charakteristiky sú vypočítané podľa nasledujúcich vzťahov:

2) Stredný priemer špirály D_s

$$D_s = \frac{l}{n \cdot \pi} \quad (12)$$

3) Stredný priemer vinutia D_C

$$D_C = \sqrt{D_s^2 - \left(\frac{h}{\pi} \right)^2} \quad (13)$$

4) Stredný priemer zakrivenia D

$$D = D_C \left[1 + \left(\frac{h}{\pi \cdot D_C} \right)^2 \right] \quad (14)$$

3.2.2 Výpočet tlakovej straty ohrevného média prechodom ohrevným hadom

Podľa [2] je tlakovú stratu média prechodom špirálou možno spočítať použitím nasledujúceho vzťahu (15):

$$\Delta p = \zeta \frac{l}{d_i} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (15)$$

kde

ζ koeficient trenia [-],

l dĺžka trubky skrutkovice [m],

d_i vnútorný priemer trubky skrutkovice [m],

ρ hustota kvapaliny [kg/m³],

v rýchlosť prúdenia [m/s],

a pre koeficient trenia ζ platí:

$$1) \quad 1 < (Re \sqrt{d/D}) < (Re_{crit} \sqrt{d/D})$$

$$\zeta = \frac{64}{Re} \left[1 + 0,033 \left(\log_{10} \left\{ Re \sqrt{\frac{d}{D}} \right\} \right)^4 \right] \quad (16)$$

$$2) \quad Re_{crit} < Re < 100\,000$$

$$\zeta = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \left[1 + 0,095 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,5} Re^{0,25} \right] \quad (17)$$

3.3 Tepelne-hydraulický výpočet na procesnej strane

3.3.1 Výpočet súčiniteľa prestupu tepla pri voľnej konvekcii (bez použitia miešania)

Prestup tepla voľnou konvekciou prebieha pri prúde kvapaliny, ktoré je spôsobené nerovnomerným rozložením hustoty kvapaliny. To môže byť následok nehomogénneho ohrevu alebo nerovnomernej koncentrácie prímеси, napr. soli v morskej vode.[2]

Podľa [2] je na výpočet koeficientu prestupu tepla pri voľnej konvekcii na vonkajšej strane valcového telesa doporučený nasledujúci postup:

- 1) Rayleighovo číslo Ra :

$$Ra = \frac{\beta g \Delta T L^3}{\nu \kappa} \quad (18)$$

- 2) Prandtlovo číslo Pr :

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa} \quad (19)$$

- 3) Pomocná funkcia $f(Pr)$:

$$f = \left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{-\frac{16}{9}} \quad (20)$$

- 4) Nusseltovo číslo Nu :

$$Nu_c = \{0,6 + 0,387[Ra \cdot f]^{1/6}\}^2 \quad (21)$$

- 5) Výpočet súčiniteľa prestupu tepla α_c

$$\alpha_c = \frac{Nu_c \lambda}{T} \quad (22)$$

3.3.2 Výpočet súčiniteľa prestupu tepla pri nútenej konvekcii

Korelácie na výpočet súčiniteľa prestupu tepla v miešanej nádobe majú nasledujúcu formu (23):

$$Nu_c = K \cdot Re^a Pr^b \mu_R^c G_C, \quad (23)$$

kde K , a , b , c , predstavujú konštanty závislé na type miešadla, Re a Pr známe bezrozmerné čísla, μ_R pomer viskozity média v jadre prúdu a pri stene trubky a G_C predstavuje geometrickú korekciu.

Pre prípad ohrevu nádrže ohrevným hadom pri miešaní axiálnym miešadlom so savkou bez použitia narážok sa nepodarilo nájsť vzťahy na výpočet Nusseltovho čísla. K dispozícii sú vzťahy platné pre samostatné axiálne miešadlá, preto bude ďalej v práci počítané s nimi. Výpočtové konštanty platné pre takúto konfiguráciu sa podarilo nájsť pre turbínové a vrtuľové miešadlo, uvedené sú v tabuľke 5.

Tabuľka 5 Výpočtové konštanty pre dva typy miešadiel [13]

Typ miešadla	K	a	b	c	G_c
Vrtuľové (Nagata et al.)	0,05	0,62	1/3	0,14	$\left(\frac{T}{\frac{d_m}{3}}\right)^{0,15} \left(\frac{d_o}{\frac{T}{0,03}}\right)^{0,5}$
Turbínové (Nagata et al.)	0,08	0,56	1/3	0,14	$\left(\frac{L}{\frac{d_m}{\frac{1}{5}}}\right)^{0,15} \left(\frac{d_o}{\frac{T}{0,064}}\right)^{0,5}$

kde

T priemer nádrže [m]

d_o vonkajší priemer trubky hada [m]

d_m ... priemer miešadla [m]

L výška lopatky miešadla vzhľadom k osi rotácie [m]

H výška hladiny kvapaliny [m]

Súčiniteľ prestupu tepla získame opäť zo vzťahu (24):

$$\alpha_c = \frac{Nu_c \cdot \lambda}{T} \quad (24)$$

3.3.3 Výpočet priemernej teplota steny ohrevného hada

Pri výpočte Nusseltových čísel sa v použitých vzťahoch objavujú členy zohľadňujúce zmenu fyzikálnych vlastností pri ohreve média. Teplota na vonkajšej a vnútornej strane steny ohrevného hada je odlišná, pre zjednodušenie výpočtov bude považovaná za konštantnú a je vypočítaná zo vzťahu (25): [2]

$$T_w = T_h - \frac{T_h - T_c}{1 + \frac{\alpha_h A_i}{\alpha_c A_o}} \quad (25)$$

kde

T_h teplota ohrevného média v jadre prúdu [°C],

T_c teplota ohrievaného média v jadre prúdu [°C].

3.3.4 Výpočet celkového súčiniteľa prestupu tepla U

Na výpočet celkového súčiniteľa prestupu tepla U je použitý vzťah pre prestup tepla okrúhrou trúbkou (26) [6]:

$$\frac{1}{UA_o} = R_i + \frac{1}{\alpha_h A_i} + \frac{t_t}{A_m \lambda_t} + \frac{1}{\alpha_c A_o} + R_o \quad (26)$$

po úprave:

$$U = \frac{A_o}{R_i + \frac{1}{\alpha_h A_i} + \frac{t_t}{A_m \lambda_t} + \frac{1}{\alpha_c A_o} + R_o} \quad (27)$$

kde

A_i vnútorná plocha skrutkovice [m^2],
 A_o vonkajšia plocha skrutkovice [m^2],
 A_m ... stredná plocha skrutkovice [m^2],
 α_h vnútorný súčiniteľ prestupu tepla [$W/(m^2K)$],
 α_i vonkajší súčiniteľ prestupu tepla [$W/(m^2K)$],
 R_i tepelný odpor na vnútornej strane skrutkovice [m^2K/W],
 R_o tepelný odpor na vonkajšej strane skrutkovice [m^2K/W],
 t_t hrúbka steny skrutkovice [m],
 λ_t tepelná vodivosť materiálu skrutkovice [$W/(mK)$].

3.4 Doba ohrevu

Výpočet doby ohrevu vychádza z rovnosti tepla akumulovaného v nádrži za jednotku času a tepla odovzdaného ohrevným médiom za jednotku času (27):

$$mc_p \frac{dT}{dt} = \alpha A (T_h - T_c) \quad (28)$$

kde

m hmotnosť ohrievaného média [kg],
 c_p tepelná kapacita ohrievaného média [$J/kg.K$],
 U celkový súčiniteľ prestupu tepla [$W/m^2.K$],
 A teplovýmenná plocha [m^2],
 T_h teplota ohrevného média [$^{\circ}C$],
 T_c ohrievaného média [$^{\circ}C$].

Za predpokladu, že α je konštantou (obvykle stačí rozumné priblíženie), tak je rovnicu možné integráciou upraviť do nasledujúceho tvaru (28):

$$\ln \frac{T_h - T_{c,i}}{T_h - T_{c,o}} = \frac{U A t}{m c_p} \quad (29)$$

kde

$T_{c,i}$... počiatočná teplota ohrievaného média [$^{\circ}C$],
 $T_{c,o}$... konečná teplota ohrievaného média [$^{\circ}C$],
 t doba ohrevu [s].

Uvedený postup platí v prípade, že sa jedná o izotermický ohrev, kedy sa teplota ohrevného média T_h nemení (napríklad ohrev kondenzáciou pary, resp. elektrický ohrev). Ďalšími úpravami rovnice získame vzťah na výpočet doby ohrevu (29):

$$\frac{T_h - T_{c,o}}{T_h - T_{c,i}} = \exp \left(- \frac{\alpha A}{m c_p} t \right) \quad (30)$$

$$t = \ln \left(\frac{T_h - T_{c,i}}{T_h - T_{c,o}} \right) \cdot \left(\frac{m c_p}{\alpha A} \right) \quad (31)$$

Pre prípad neizotermického ohrevu je potrebné vziať do úvahy zmenu teploty ohrevného média. Takým ohrevom je napríklad ohrev teplou vodou, resp. v prípade vyhrievacej nádrže ohrev teplým kalom. Teplota ohrevného média sa mení

z konštantnej vstupnej teploty $T_{h,i}$ na časovo závislú výstupnú teplotu $T_{h,o}(t)$. Pre tento prípad je doporučený vzťah na výpočet teploty obsahu nádrže $T_{c,o}$ v závislosti na dobe ohrevu t (32), ktorý bol upravený do tvaru na výpočet potrebnej doby ohrevu t na dosiahnutie požadovanej teploty obsahu nádrže $T_{c,o}$ (33). [2]

$$\frac{T_{h,i}-T_{c,o}}{T_{h,i}-T_{c,i}} = \exp \left[-\frac{\dot{m}_h c_h}{m c_p} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\alpha A}{\dot{m}_h c_h} \right) \right\} t \right] \quad (32)$$

$$t = \left(-\frac{\dot{m}_h c_h}{m c_p} \right) \cdot \ln \left(\frac{T_{h,i}-T_{c,i}}{T_{h,i}-T_{c,o}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - \exp \left(-\frac{\alpha A}{\dot{m}_h c_h} \right)} \right) \quad (33)$$

kde

\dot{m}_h ... hmotnostný prietok ohrevného média [kg/s],

c_h tepelná kapacita ohrevného média [J/kg.K].

3.5 Výpočet príkonu miešadla

Príkon miešadla je množstvo mechanickej energie za jednotku času odovzdanej miešadlom miešanej tekutine. Na určenie príkonu je možno použiť niekoľko postupov, najpoužívanejší však využíva vzťah v nasledujúcom tvare (34) [19]:

$$N_p = f(Re_m, Fr, \text{geometrické parametre}) \quad (34)$$

kde

N_p je Newtonovo číslo (príkonová charakteristika, označované tiež Ne)

$$N_p = \frac{P}{D^5 N^3 \rho} \quad (35)$$

a P – výkon na hriadeli miešadla [W],

Re_m je Reynoldsovo číslo miešania

$$Re_m = \frac{D^2 N \rho}{\mu}, \quad (36)$$

Fr je Froudovo číslo

$$Fr = \frac{DN^2}{g}. \quad (37)$$

Froudovo číslo berie do úvahy správanie tekutiny na voľnej hladine, najmä tvorenie centrálného víru. Pokiaľ je výskyt vírenia eliminovaný napríklad použitím narážok, Froudovo číslo môže byť zanedbané a pri dodržaní geometrických podobností vzťah na určenie Newtonovho čísla prechádza do tvaru[2]:

$$N_p = f(Re_m) \quad (38)$$

Podľa výsledkov skúmaní Newtonovo číslo v laminárnej oblasti možno vyjadriť nasledovne [2]:

$$N_p = \frac{C_{N,lam}}{Re_m} \quad (39)$$

a v turbulentnej oblasti nasledovne[2]:

$$N_p = \frac{C_{N,turb}}{Re_m^m} \quad (40)$$

kde $C_{N,lam}$ a $C_{N,turb}$ predstavujú konštanty. V oblasti vysokých Re_m ($>10^4$) je Newtonovo číslo takmer konštantou, k určení konkrétnej hodnoty konkrétneho typu miešadla sa obvykle používajú grafické závislosti.

Hodnoty N_p pro rôzne typy miešadiel sú uvedené v tabuľke 6.

Tabuľka 6 Newtonovo číslo vybraných miešadiel v turbulentnej oblasti [12]

Typ miešadla	N_p
Vrtuľové	
stúpanie 1	0.34
stúpanie 1,5	0.62
Turbínové	
4 lopatky, sklon 45°	1,27
6 lopatiek, sklon 45°	1,64

4 TVORBA VÝPOČTOVÉHO NÁSTROJA

Na základe predchádzajúcich informácií a vzťahov bol v programe Microsoft Excel vytvorený výpočtový nástroj. Je to samostatný zošit obsahujúci niekoľko listov, v ktorých sa nachádza tepelne hydraulický výpočet miešanej nádoby a k nemu potrebné dáta.

4.1 List VÝPOČET

V tomto liste prebieha samotný výpočet ohrevu vyhrievacej nádrže. Je rozdelený na dve časti.

Prvá časť listu sa nachádza na ľavej strane. Je koncipovaná takým spôsobom, aby bolo možné jej exportom prípadne tlačou získať prehľadný výpočtový protokol obsahujúci kľúčové dáta a výsledky výpočtu. Protokol je rozdelený na dve časti, a to časť s výpočtami na strane ohrevného média a časť s výpočtami na strane kalu. V dolnej časti protokolu sú potom umiestnené celkové výsledky výpočtu. V prvej časti listu je niekoľko krát využitá funkcia rolacieho zoznamu, ktorá umožňuje vybrať požadovaný parameter z viacerých možností. Príkladom je výber metódy miešania nádrže, kde je možné zvoliť jednu z troch možností a to ohrev bez miešania, ohrev s miešaním za použitia vrtuľového alebo turbínového miešadla, pričom výsledný súčiniteľ prestupu tepla bude zodpovedať zvolenej metóde ohrevu. Výpočtový protokol obsahuje nasledujúce dáta:

- geometrické parametre nádrže, ohrevného hada a miešadla zadané užívateľom,
- výpočet termo-fyzikálnych vlastností ohrievaného a ohrevného média,
- výpočet súčiniteľov prestupu tepla na strane ohrievaného a ohrevného média,
- výsledky výpočtu celkového súčiniteľa prestupu tepla, tlakovej straty ohrevného média a doby ohrevu.

Pohľad na prvú časť listu – výpočtový protokol – poskytuje obrázok 19.

VÝPOČETNÍ PROTOKOL							
Předmět	Výpočet ohřevu kalu ve vyhřívací nádrži						
Datum	25.5.2017						
Autor	Bc. Šimon Cupra						
STRANA OHŘEVNÉHO MÉDIA			STRANA KALU				
VSTUPNÍ PARAMETRY			VSTUPNÍ PARAMETRY				
Střední průměr spirály	Ds	[m]	9	Průměr nádrže	T	[m]	10
Vnitřní průměr trubky	d i	[mm]	200	Výška hladiny	H	[m]	12
Vnější průměr trubky	d o	[mm]	219	Objem náplně	Vt	[m3]	942,477796
Tloušťka stěny	tt	[mm]	6,3				
Délka hadu	l	[m]	424,115008				
Počet otáček	n	[-]	15				
Rozteč	p	[mm]	500				
VLASTNOSTI OHŘEVNÉHO MÉDIA			VLASTNOSTI KALU				
Ohrevné médium	Voda		Počáteční teplota	Tci	[°C]	25	
Vstupní teplota	Thi	[°C]	90	Provozní teplota	Tco	[°C]	55
Průtok média	mh	[kg/s]	80	Součinitel zanášení	f	[m2.K/W]	0,0001
Součinitel zanášení	f	[m2.K/W]	0,0001	Hustota	ρ	[kg/m3]	968,82
Hustota	ρ	[kg/m3]	971,7898	Zd. viskozita	η zd	[Pa.s]	0,00528591
Viskozita	η	[Pa.s]	0,00035435	Tepelná kapacita	Cp	[J/kg.K]	4090
Tepelná kapacita	Cp	[J/kg.K]	4196,7562	Tepelná vodivost	λ	[W/m.K]	0,6465
Tepelná vodivost	λ	[W/m.K]	0,67001439	Souč. tepelné roztažnosti	β	[1/K]	0,0003
Viskozita u stěny	ηw	[Pa.s]	0,00036807	Zd. viskozita u stěny	η zd w	[Pa.s]	0,00787506
VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA			VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA				
Reynoldsovo číslo	Re	[-]	1237064,57	Režim	Ohřev za použití turbínového míchadla (dle Nagata)		
Prandtlovo číslo	Pr	[-]	2,21951872	Průměr míchadla	dm	[mm]	1000
Prandtlovo č. pri stene	Pr w	[-]	2,3054955	Výška lopatky turbíny	L	[mm]	200
Nusseltovo číslo	Nu	[-]	3519,27476				
Součinitel přestupu tepla	αh	[W/m2.K]	11424,2477	Otáčky míchadla	Nm	[rpm]	100
Materiál hadu	Nerezová ocel		Reynoldsovo číslo	Rem	[-]	305472,526	
Tepelná vodivost materiál	λt	[W/m.K]	30	Prandtlovo číslo	Pr	[-]	33,4406314
				Prandtlovo č. pri stene	Pr w	[-]	49,820593
				Grashofovo číslo	Gr	[-]	6,7E+07
				Nusseltovo číslo	Nu	[-]	57,0101357
				Součinitel přestupu tepla	αc	[W/m2.K]	168,297045
VÝSLEDKY							
Součinitel prostupu tepla	U	[W/m2.K]	154,867334	Pozn.: veličiny ve vybodkovaných buňkách zadává uživatel			
Tlaková ztráta ohř. média	Δp	[kPa]	66,9459267				
Typ ohřevu	Neizotermální ohřev						
Doba ohřevu	t	[h]	15,6130795				

Obrázok 18 Výpočtový protokol

V druhej časti listu sú umiestnené všetky pomocné výpočty:

- (1) Výpočet geometrických parametrov ohrevného hada, najmä stredného priemeru zakrivenia, prietokového prierezu trubky, vnútornej a vonkajšej výmennej plochy tepla (pozri tabuľku 7).

Tabuľka 7 Výpočet geometrie

Výpočet geometrie			
Střední průměr spirály	Ds	8,488263632	m
Střední průměr vinutí	Dc	8,487890604	m
Střední průměr zakřivení	D	8,488636676	m
Vnitřní průměr trubky	d i	0,150	m
Průtočný průřez	Af	0,019855651	m ²
Vnitřní plocha hadu	Ai	188,4955592	m ²
Vnější plocha hadu	Ao	199,8052928	m ²
Průměrná plocha hadu	Am	194,0955119	m ²

- (2) Tepelno-hydraulický výpočet na vnútornej strane hada, ktorého výsledkom je súčiniteľ prestupu tepla. Potrebné parametre a výsledné hodnoty Nusseltovho čísla sú uvedené v tabuľke 8.

Tabuľka 8 Výpočet na vnútornej strane hada

Výpočet uvnitř hadu			
Rychlost proudění	v	1,781676749	m/s
Kritické Reynoldsovo číslo	Re _{crit}	5517,290513	-
Reynoldsovo číslo	Re	459410,5603	-
Nusselt Laminar	m	0,632682663	
	Nu _{lam}	489,2693819	-
Nusselt Turbulent	ξ	0,01614101	
	Nu _{turb}	1926,655913	-
Nusselt Transition	Y	-	
		26,53753988	
	Nu _{trans}	1658,148691	-

- (3) Tepelno-hydraulický výpočet na vonkajšej strane hada, ktorého výsledkom je súčiniteľ prestupu tepla pre rôzne prevádzkové konfigurácie. Uvažovanými konfiguráciami je ohrev bez miešania (voľno konvekciou), ohrev s miešaním vrtulovým a turbínovým miešadlom. V tabuľke 9 je uvedený výpočet ohrevu voľnou konvekciou. V tabuľke 10 sú uvedené parametre jednotlivých miešadiel potrebné na výpočet súčiniteľa prestupu tepla počas miešania podľa vzťahu (23).

Tabuľka 9 Výpočet súčiniteľa prestupu tepla pri voľnej konvekcii

Výpočet vně hadu			
Volná konvekce			
Pomocná funkcia	f	0,732504456	-
Nusseltovo číslo	Nu_h	197,7349947	-
Souč. Přestupu tepla	α_c	746,1697913	W/m ² K

Tabuľka 10 Výpočet súčiniteľa prestupu tepla pri nútenej konvekcii

Nucená konvekce							
Parametry pro výpočet míchadel							
Typ míchadla	K	a	b	c	G_c	Nu_c	α_c
Vrtulové [12]	0,016	0,67	0,37	0,14	0,28	240,8	908,8
Turbínové so skloněnými lopatkami [12]	0,03	0,67	0,33	0,14	0,46	396,4	1496,1
Vrtulové [13]	0,05	0,62	0,33	0,14	1	358,4	1352,7
Turbínové so skloněnými lopatkami [13]	0,08	0,56	0,33	0,14	1	261,2	985,9

- (4) Výpočet zdanlivej viskozity čistiarenského kalu. Ná základe predchádzajúcich znalostí bola určená konštanta úmernosti miešadla k_s a následne z otáčok určená šmyková rýchlosť. Zdanlivá viskozita kalu je podielom šmykového napätia a šmykovej rýchlosti. Pre požadovanú teplotu a známu šmykovú rýchlosť je šmykové napätie zistené z dát poskytnutých pani Ing. Houdkovou. Za zámerom zjednodušenia odčítania šmykového napätia boli dáta pre jednotlivé merané teploty kalu aproximované polynómom druhého stupňa, ktorého parametre sú uvedené v tabuľke 11. Následne bola pre zjednodušenie výpočtu pre dané šmykové napätie vypočítaná zdanlivá viskozita pre každú meranú teplotu. V prípade potreby zistenia zdanlivej viskozity pri teplote, pri ktorej nie sú k dispozícii dáta z merania, použije sa prístup lineárnej závislosti medzi najbližšou menšou a väčšou hodnotou. Na konci je výpočet pomeru viskozity média v jadre prúdu a pri stene ohrevného telesa.

Tabuľka 11 Parametre polynómu aproximujúceho namerané dáta

T [°C]	a	b	c
25	3,00E-06	0,0048	-0,1055
30	3,00E-06	0,0040	-0,0106
40	3,00E-06	0,0033	0,0354
50	3,00E-06	0,0029	0,0376
60	3,00E-06	0,0027	0,0290
70	3,00E-06	0,0019	0,0919
80	2,00E-06	0,0013	0,1247

Tabuľka 12 Výpočet zdanlivej viskozity pre dostupné merané teploty

Konstanta umernosti míchadla	k_s	11	[-]
Smyková rýchlosť kalu	γ	73,33333333	[1/s]
Zdanliva viskozita pri 25°C	η zd 25	0,003581364	[Pa.s]
Zdanliva viskozita pri 30°C	η zd 30	0,004075455	[Pa.s]
Zdanliva viskozita pri 40°C	η zd 40	0,004002727	[Pa.s]
Zdanliva viskozita pri 50°C	η zd 50	0,003632727	[Pa.s]
Zdanliva viskozita pri 60°C	η zd 60	0,003315455	[Pa.s]
Zdanliva viskozita pri 70°C	η zd 70	0,003373182	[Pa.s]
Zdanliva viskozita pri 80°C	η zd 80	0,003147121	[Pa.s]
Poměr viskozit	η R	0,87876422	[-]

- (5) Výpočet tlakovej straty ohrevného média je uvedený v tabuľke 13 pre dva režimy prúdenia: Prvým je oblasť laminárneho a prechodného prúdenia, druhým je oblasť turbulentného prúdenia. Na základe Reynoldsovo kritéria bol určený režim prúdenia média v ohrevnom telese a do výpočtového protokolu bol uvedený zodpovedajúci výsledok.

Tabuľka 13 Výpočet tlakovej straty ohrevného média

Typ proudění	Lam+Trans	Turb	Jedn.
Součinitel tření	0,002551	0,01614872	-
Tlaková ztráta	10682,2203	67622,25805	Pa
	10,6822203	67,62225805	kPa

- (6) Výpočet teplôt médií potrebných na určenie celkového súčiniteľa prestupu tepla, najmä stredných teplôt a teploty steny stene ohrevného telesa je uvedená v tabuľke 14. V tabuľke 15 sú uvedené orientačné hodnoty tepelnej vodivosti materiálov ohrevného telesa. Tieto hodnoty sú súčasťou rolovacého zoznamu, to znamená, že užívateľ programu si zvolí požadovaný materiál a príslušná hodnota sa automaticky použije pri výpočte celkového súčiniteľa prestupu tepla α . Jeho výpočet je vykonaný priamo vo výpočtovom protokole.

Tabuľka 14 Teploty médií

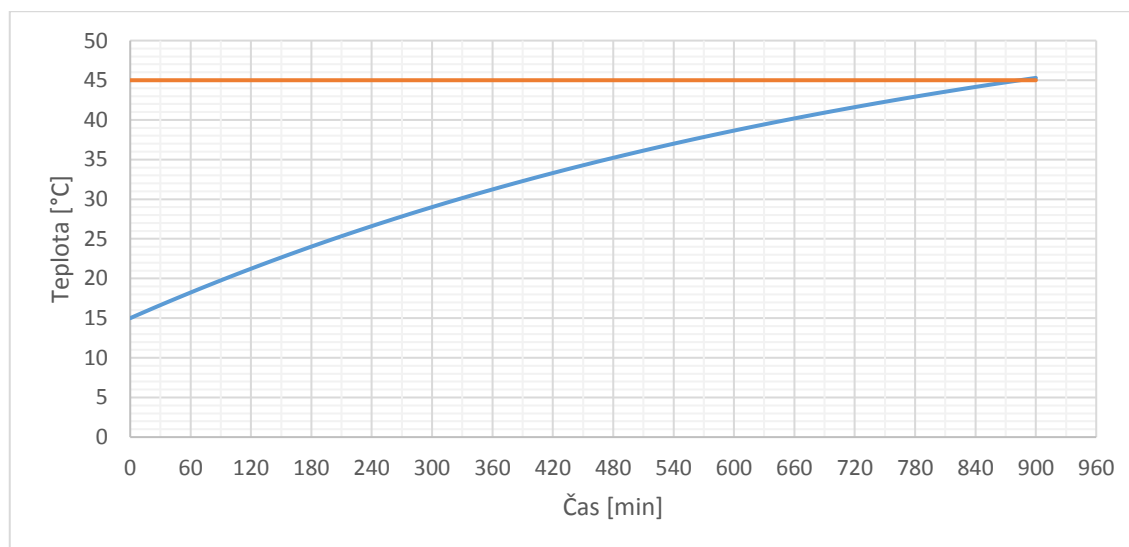
Výpočet prostupu tepla			
Výstupní tep. ohř. média	Tho	[°C]	35,82364
Průměrná tep. ohř. média	Thm	[°C]	47,91182
Průměrná tep. Kalu	Tcm	[°C]	35
Teplota stěny trubky	Tw	[°C]	46,83724

Tabuľka 15 Približná tepelná vodivosť materiálu ohrevného telesa

Materiál hadu	λ_t [W/mK]
Slitina hliníku	100
Nerezová ocel	30
Uhlíková ocel	50

4.2 List Priebeh teploty

Obsahom listu je grafické znázornenie priebehu teploty v nádrži pre zvolený spôsob ohrevu (pozri obrázok 20). Tento list má informačný charakter.



Obrázok 19 Graf priebehu teploty kalu v nádrži

4.3 List Rozmery trubiek

Obsahom tohto listu sú rozmery bezšvových oceľových trubiek (tabuľka 16). Tieto rozmery sú použité pri výpočtoch, v liste Výpočet je možné zvoliť rozmer trubky (prvý stĺpec tabuľky) a výpočtový program potom automaticky doplní priemer trubky a hrúbku jej steny.

Tabuľka 16 Doporučené rozmery trubky ohrevného hada

Vnější pr./tl. stěny		Jmen. světlost v mm	Vnější průměr trubky	Tloušťka stěny trubky	Vnitřní průměr trubky	Objem 1,0m trubky	Světlý průřez trubky	Povrch 1,0m trubky	Hmotnost 1,0m trubky
D/tl. stěny		DN	D	t	d1	V	A	S	M
[mm/mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³ /m]	[m ² ·10 ⁻⁴]	[m ² /m]	[kg/m]
22,0/2,6	×	15	22	2,6	16,8	0,2217	2,2176	0,0691	1,244
28,0/2,6	×	20	28	2,6	22,8	0,4083	4,0828	0,088	1,629
31,8/2,6	×	25	31,8	2,6	26,6	0,5557	5,5572	0,0999	1,872
38,0/2,6	×	32	38	2,6	32,8	0,845	8,4496	0,1194	2,27
44,5/2,6	×	40	44,5	2,6	39,3	1,213	12,1304	0,1398	2,687
51,0/2,6		40	51	2,6	45,8	1,6475	16,4748	0,1602	3,103
57,0/2,9	×	50	57	2,9	51,2	2,0589	20,5887	0,1791	3,869
60,3/2,9		50	60,3	2,9	54,5	2,3328	23,3283	0,1894	4,105
70,0/3,2		50	70	3,2	63,6	3,1769	31,769	0,2199	5,272
76,0/3,2	×	65	76	3,2	69,6	3,8046	38,0459	0,2388	5,745
89,0/3,6	×	80	89	3,6	81,8	5,2553	52,5529	0,2796	7,582
108,0/4,0	×	100	108	4	100	7,854	78,5398	0,3393	10,259
133,0/4,5	×	125	133	4,5	124	12,076	12,763	0,4178	14,261
159,0/4,5	×	150	159	4,5	150	17,671	176,715	0,4995	17,146
219,0/6,3	×	200	219	6,3	206,4	33,459	334,587	0,688	33,047
273,0/7,0	×	250	273	7	259	52,685	526,853	0,8577	45,92
324,0/8,0	×	300	324	8	308	74,506	745,06	1,0179	62,344
377,0/9,0	×	350	377	9	359	101,223	1012,229	1,1844	81,679
457,0/14,0		400	457	14	429	144,545	1445,455	1,4357	152,951
508,0/14,0		450	508	14	480	180,956	1809,557	1,5959	170,559

x – doporučená rada

4.4 List Vlastností kalu

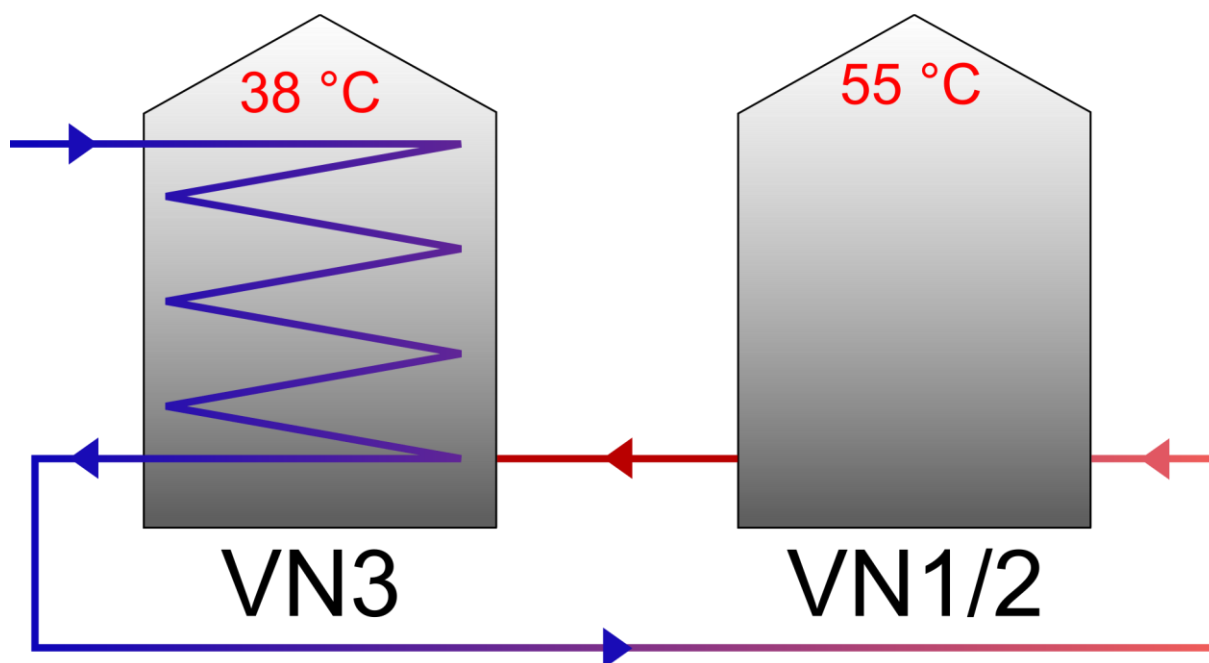
Tento list obsahuje dáta potrebné na určenie termo-fyzikálnych vlastností čistiarenskeho kalu. Vlastnosti kalu sa výrazne odlišujú, závisia na druhu kalu, lokalite ČOV prípadne type odpadnej vody. List obsahuje experimentálne namerané dáta z merania fyzikálnych vlastností vyhnitého kalu z ČOV Brno a to najmä dáta potrebné ku zisteniu viskozity kalu, konkrétne závislosť šmykového napätia na šmykovej rýchlosti pre rôzne merané teploty kalu. Dáta boli poskytnuté pani Ing. Houdkovou.

4.5 List Vlastnosti vody

Obsahom tohto listu sú termo-fyzikálne vlastnosti vody, ktorá môže byť uvažovaná ako ohrevné médium. Jedná sa najmä o hustotu, tepelnú kapacitu, viskozitu a tepelnú vodivosť pri teplotách od 1 do 99°C s odstupňovaním po 1 °C.

4.6 Aplikácia výpočtového nástroja

Výpočtový nástroj bude použitý na príklade výpočtu ohrevu čistiarenskeho kalu v zariadení ČOV Havířov, kde je potrebný návrh ohrevu surového kalu počas stabilizácie za použitia vnútorného ohrevného telesa. Úsek anaeróbnej stabilizácie ČOV Havířov sa skladá z troch vyhnívacích nádrží VN1, VN2 a VN3. Vo VN1 a VN2 prebieha stabilizácia surového kalu v termofilnom režime (pri 55 °C), kal je tu zadržaný na 20 až 30 dní. Nádrž VN3 je sériovo zapojená za VN1 a VN2, obsahuje stabilizovaný kal z VN1/VN2 a prebieha tu dokončenie stabilizácie kalu v mezofilnom režime (pri 38 °C). Situáciu ilustruje obrázok 20.



Obrázok 20 Ilustrácia riešenej situácie

Pre úplnosť zadania je potrebné mať k dispozícii nasledovné informácie:

- prevádzkové parametre diela
- konštrukčné parametre diela
- parametre procesných médií

Prevádzkové parametre diela boli stanovené na základe dostupných informácií v literatúre [5] a po konzultácii s vedúcim práce. Výpočet parametrov procesných médií bol popísaný v predchádzajúcich kapitolách. Pre výpočet potrebné konštrukčné parametre diela nie sú k dispozícii, budú preto pre navrhnuté.

4.6.1 Výpočet návrhu ohrevu surového kalu

Popis problému

Surový kal je prečerpávaný do vyhniávacej nádrže VN1 resp. VN2 pri teplote 25 °C a je potrebné ho ohriať na teplotu 55 °C, pri ktorej prebehne stabilizácia kalu v termofilnom režime pri súčasnej produkcii bioplynu. Na ohrev bude použité skrutkové ohrevné teleso (ohrevný had), ktorým bude prúdiť voda s teplotou 90 °C, jedná sa teda o neizotermický ohrev.

Vyhniávacia nádrž má priemer 10 m a výšku hladiny 12 m. Ohrevný had má priemer 9 m, stúpanie 500 mm a 15 otáčok. Svetlosť trubky hada bola s ohľadom na rýchlosť prúdenia vody a jej požadovanú výstupnú teplotu (70 °C) stanovená na 200 mm. Za materiál ohrevného hada bola zvolená nehrdzavejúca oceľ.

Na diele nie je použité mechanické miešadlo, bude preto navrhnuté. Pri návrhu boli do úvahy vzaté nasledujúce faktory:

- dostupné vzťahy na výpočet prestupu tepla a z nich plynúce geometrické simplex experimentálnych zariadení, na ktorých boli vzťahy stanovené
- doporučený rozsah hodnôt Reynoldsovho kritéria pri miešaní
- rozmery vyhniávacej nádrže

Vzhľadom na vyššie uvedené boli navrhnuté nasledujúce parametre miešadla:

- priemer miešadla $d_m = 1000$ mm
- výška lopatky miešadla $L = 200$ mm
- otáčky miešadla $N_m = 100$ otáčok/ minútu

Na výpočet bol použitý vytvorený výpočtový nástroj a výstupom výpočtu sú tri protokoly. Prvý z nich popisuje výsledky návrhu ohrevu nádrže bez použitia miešania, druhý ohrev so zapojením miešania vrtuľovým a tretí turbínovým miešadlom. Výpočtové protokoly pre každý prípad sú uvedené na obrázkoch 21 až 23.

VÝPOČETNÍ PROTOKOL									
Předmět		Výpočet ohřevu kalu ve vyhřívací nádrži							
Datum		25.5.2017							
Autor		Bc. Šimon Cupra							
STRANA OHŘEVNÉHO MÉDIA					STRANA KALU				
VSTUPNÍ PARAMETRY					VSTUPNÍ PARAMETRY				
Střední průměr spirály	Ds	[m]		9	Průměr nádrže	T	[m]		10
Vnitřní průměr trubky	d i	[mm]		200	Výška hladiny	H	[m]		12
Vnější průměr trubky	d o	[mm]		219	Objem náplně	Vt	[m3]		942,477796
Tloušťka stěny	tt	[mm]		6,3					
Délka hadu	l	[m]		424,115008					
Počet otáček	n	[-]		15					
Rozteč	p	[mm]		500					
VLASTNOSTI OHŘEVNÉHO MÉDIA					VLASTNOSTI KALU				
Ohrevné médium			Voda		Počáteční teplota	Tci	[°C]		25
Vstupní teplota	Thi	[°C]		90	Provozní teplota	Tco	[°C]		55
Průtok média	mh	[kg/s]		80	Součinitel zanášení	f	[m2.K/W]		0,0001
Součinitel zanášení	f	[m2.K/W]		0,0001	Hustota	ρ	[kg/m3]		968,82
Hustota	ρ	[kg/m3]		971,7898	Zd. viskozita	η zd	[Pa.s]		0,00528591
Viskozita	η	[Pa.s]		0,00035435	Tepelná kapacita	Cp	[J/kg.K]		4090
Tepelná kapacita	Cp	[J/kg.K]		4196,7562	Tepelná vodivost	λ	[W/m.K]		0,6465
Tepelná vodivost	λ	[W/m.K]		0,67001439	Souč. tepelné roztažnosti	β	[1/K]		0,0003
Viskozita u stěny	ηw	[Pa.s]		0,00036807	Zd. viskozita u stěny	η zd w	[Pa.s]		0,00787506
VÝPOČET SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA					VÝPOČET SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA				
Reynoldsovo číslo	Re	[-]		1237064,57	Režim	Ohřev bez míchadla			
Prandtlovo číslo	Pr	[-]		2,21951872	Průměr míchadla	dm	[mm]		1000
Prandtlovo č. při stěně	Pr w	[-]		2,3054955	Výška lopatky turbíny	L	[mm]		200
Nusseltovo číslo	Nu	[-]		3519,27476					
Součinitel přestupu tepla	αh	[W/m2.K]		11424,2477	Otáčky míchadla	Nm	[rpm]		100
Materiál hadu				Nerezová ocel	Reynoldsovo číslo	Rem	[-]		305472,526
Tepelná vodivost materiál	λt	[W/m.K]		30	Prandtlovo číslo	Pr	[-]		33,4406314
					Prandtlovo č. při stěně	Pr w	[-]		49,820593
					Grashofovo číslo	Gr	[-]		6,7E+07
					Nusseltovo číslo	Nu	[-]		202,37052
					Součinitel přestupu tepla	αc	[W/m2.K]		597,408865
VÝSLEDKY									
Součinitel prostupu tepla	U	[W/m2.K]		456,796186	Pozn.: veličiny ve vybodkovaných buňkách zadává uživatel				
Tlaková ztráta ohř. média	Δp	[kPa]		66,9459267					
Typ ohřevu	Neizotermální ohřev								
Doba ohřevu	t	[h]		5,97964553					

Obrázok 21 Výpočtový protokol ohřevu vyhřívací nádrže vnútorným ohrevným telesom bez miešania.

VÝPOČETNÍ PROTOKOL							
Předmět	Výpočet ohřevu kalu ve vyhřívací nádrži						
Datum	25.5.2017						
Autor	Bc. Šimon Cupra						
STRANA OHŘEVNÉHO MÉDIA				STRANA KALU			
VSTUPNÍ PARAMETRY				VSTUPNÍ PARAMETRY			
Střední průměr spirály	Ds	[m]	9	Průměr nádrže	T	[m]	10
Vnitřní průměr trubky	d i	[mm]	200	Výška hladiny	H	[m]	12
Vnější průměr trubky	d o	[mm]	219	Objem náplně	Vt	[m3]	942,477796
Tloušťka stěny	tt	[mm]	6,3				
Délka hadu	l	[m]	424,115008				
Počet otáček	n	[-]	15				
Rozteč	p	[mm]	500				
VLASTNOSTI OHŘEVNÉHO MÉDIA				VLASTNOSTI KALU			
Ohrevné médium	Voda			Počáteční teplota	Tci	[°C]	25
Vstupní teplota	Thi	[°C]	90	Provozní teplota	Tco	[°C]	55
Průtok média	mh	[kg/s]	80	Součinitel zanášení	f	[m2.K/W]	0,0001
				Hustota	ρ	[kg/m3]	968,82
Součinitel zanášení	f	[m2.K/W]	0,0001	Zd. viskozita	η zd	[Pa.s]	0,00528591
Hustota	ρ	[kg/m3]	971,7898	Tepelná kapacita	Cp	[J/kg.K]	4090
Viskozita	η	[Pa.s]	0,00035435	Tepelná vodivost	λ	[W/m.K]	0,6465
Tepelná kapacita	Cp	[J/kg.K]	4196,7562	Souč. tepelné roztažnosti	β	[1/K]	0,0003
Tepelná vodivost	λ	[W/m.K]	0,67001439	Zd. viskozita u stěny	η zd w	[Pa.s]	0,00787506
Viskozita u stěny	ηw	[Pa.s]	0,00036807				
VÝPOČET SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA				VÝPOČET SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA			
Reynoldsovo číslo	Re	[-]	1237064,57	Režim	Ohřev za použití vrtulového míchadla (dle Nagata)		
Prandtlovo číslo	Pr	[-]	2,21951872	Průměr míchadla	dm	[mm]	1000
Prandtlovo č. při stěne	Pr w	[-]	2,3054955	Výška lopatky turbíny	L	[mm]	200
Nusseltovo číslo	Nu	[-]	3519,27476				
Součinitel přestupu tepla	αh	[W/m2.K]	11424,2477	Otáčky míchadla	Nm	[rpm]	100
Materiál hadu	Nerezová ocel			Reynoldsovo číslo	Rem	[-]	305472,526
Tepelná vodivost materiál	λt	[W/m.K]	30	Prandtlovo číslo	Pr	[-]	33,4406314
				Prandtlovo č. při stěne	Pr w	[-]	49,820593
				Grashofovo číslo	Gr	[-]	6,7E+07
				Nusseltovo číslo	Nu	[-]	398,139742
				Součinitel přestupu tepla	αc	[W/m2.K]	1175,33033
VÝSLEDKY				Pozn.: veličiny ve vyboldkovaných buňkách zadává uživatel			
Součinitel prostupu tepla	U	[W/m2.K]	732,016577				
Tlaková ztráta ohř. média	Δp	[kPa]	66,9459267				
Typ ohřevu	Neizotermální ohřev						
Doba ohřevu	t	[h]	4,15060406				

Obrázek 22 Výpočtový protokol ohřevu vyhřívací nádrže vnútorným ohrevným telesom s miešaním vrtulovým miešadlom.

VÝPOČETNÍ PROTOKOL									
Předmět		Výpočet ohřevu kalu ve vyhřívací nádrži							
Datum		25.5.2017							
Autor		Bc. Šimon Cupra							
STRANA OHŘEVNÉHO MÉDIA					STRANA KALU				
VSTUPNÍ PARAMETRY					VSTUPNÍ PARAMETRY				
Střední průměr spirály	Ds	[m]		9	Průměr nádrže	T	[m]		10
Vnitřní průměr trubky	d i	[mm]		200	Výška hladiny	H	[m]		12
Vnější průměr trubky	d o	[mm]		219	Objem náplně	Vt	[m3]		942,477796
Tloušťka stěny	tt	[mm]		6,3					
Délka hadu	l	[m]		424,115008					
Počet otáček	n	[-]		15					
Rozteč	p	[mm]		500					
VLASTNOSTI OHŘEVNÉHO MÉDIA					VLASTNOSTI KALU				
Ohrevné médium	Voda				Počáteční teplota	Tci	[°C]		25
Vstupní teplota	Thi	[°C]		90	Provozní teplota	Tco	[°C]		55
Průtok média	mh	[kg/s]		80	Součinitel zanášení	f	[m2.K/W]		0,0001
					Hustota	ρ	[kg/m3]		968,82
Součinitel zanášení	f	[m2.K/W]		0,0001	Zd. viskozita	η zd	[Pa.s]		0,00528591
Hustota	ρ	[kg/m3]		971,7898	Tepelná kapacita	Cp	[J/kg.K]		4090
Viskozita	η	[Pa.s]		0,00035435	Tepelná vodivost	λ	[W/m.K]		0,6465
Tepelná kapacita	Cp	[J/kg.K]		4196,7562	Souč. tepelné roztažnosti	β	[1/K]		0,0003
Tepelná vodivost	λ	[W/m.K]		0,67001439	Zd. viskozita u stěny	η zd w	[Pa.s]		0,00787506
Viskozita u stěny	ηw	[Pa.s]		0,00036807					
VÝPOČET SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA					VÝPOČET SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA				
Reynoldsovo číslo	Re	[-]		1237064,57	Režim	Ohřev za použití turbínového míchadla (dle Nagata)			
Prandtlovo číslo	Pr	[-]		2,21951872	Průměr míchadla	dm	[mm]		1000
Prandtlovo č. při stěne	Pr w	[-]		2,3054955	Výška lopatky turbíny	L	[mm]		200
Nusseltovo číslo	Nu	[-]		3519,27476					
Součinitel přestupu tepla	αh	[W/m2.K]		11424,2477	Otáčky míchadla	Nm	[rpm]		100
Materiál hadu	Nerezová ocel				Reynoldsovo číslo	Rem	[-]		305472,526
Tepelná vodivost materiál	λt	[W/m.K]		30	Prandtlovo číslo	Pr	[-]		33,4406314
					Prandtlovo č. při stěne	Pr w	[-]		49,820593
					Grashofovo číslo	Gr	[-]		6,7E+07
					Nusseltovo číslo	Nu	[-]		57,0101357
					Součinitel přestupu tepla	αc	[W/m2.K]		168,297045
VÝSLEDKY					Pozn.: veličiny ve vyboldkovaných buňkách zadává uživatel				
Součinitel prostupu tepla	U	[W/m2.K]		154,867334					
Tlaková ztráta ohř. média	Δp	[kPa]		66,9459267					
Typ ohřevu	Neizotermální ohřev								
Doba ohřevu	t	[h]		15,6130795					

Obrázok 23 Výpočtový protokol ohrevu vyhřívací nádrže vnútorným ohrevným telesom s miešaním turbínovým miešadlom.

Vyhodnotenie návrhu

Z výsledkov výpočtov vyplynulo, že doba potrebná na ohrev kalu vo vyhniúvacej nádrži na požadovanú teplotu za použitia miešania vrtuľovým miešadlom je o približne tretinu kratšia ako doba ohrevu bez miešania. Výsledné hodnoty sú uvedené v tabuľke 17.

Tabuľka 17 Výsledky návrhového výpočtu

Typ ohrevu	Doba ohrevu [h]
Bez miešania	5,98
S miešaním vrtuľovým miešadlom	4,15
S miešaním turbínovým miešadlom	15,61

Celkový súčiniteľ prestupu tepla počas miešania vrtuľou dosahuje hodnotu 732 W/(m².K), pričom bez miešania je to iba 457 W/(m².K). Miešaním je obsah nádoby uvedený do pohybu čím dochádza ku zvýšeniu miery prenosu hmoty a tepla, výsledkom čoho je nárast súčiniteľa prestupu tepla. Ten je výrazný najmä v prípade turbulentného miešania.

Výpočtovým nástrojom bol overený aj variant miešania pomocou turbínového miešadla, avšak z geometrických simplexov rozmerov nádrže vystupujúcich vo výpočtovom vzťahu tohto miešadla vyplynuli vysoké odchýlky následkom čoho bola výrazne vyššia doba ohrevu. Príkladom vystupujúceho simplexu je pomer priemeru trubky ku priemeru nádrže, ktorý bol u experimentálneho zariadenia rovný 0,064, v prípade vyhniúvacej nádrže približne 0,016, čo je štvornásobne nižšia hodnota zapríčiňujúca výrazne horšie výsledky návrhu.

Aby bolo možné zabezpečiť čo najdôveryhodnejšie výsledky návrhového výpočtu, vzťah na výpočet súčiniteľa prestupu tepla je potrebné pre použité miešadlo zmerať experimentálne. V prípade dostupnosti takého vzťahu je veľmi jednoduché ho do výpočtového nástroja implementovať.

5 EXPERIMENTÁLNE MERANIE ČERPACÍCH CHARAKTERISTÍK

Za účelom návrhu vhodného typu miešania nádoby je potrebné mať k dispozícii čerpacie charakteristiky použitého miešadla. Čerpacie charakteristiky umožňujú určenie základných parametrov miešania ako sú príkon a otáčky miešadla, množstvo prečerpanej kvapaliny. Charakteristiky použitého miešadla však známe nie sú, preto je potrebné ich určiť experimentálne.

Počas písania tejto práce bolo rozhodnuté, že všetky informácie súvisiace s realizovaným experimentálnym meraním čerpacích charakteristík miešacieho čerpadla AMV 400 budú utajené. To sa týka geometrie modelového zariadenia aj nameraných dát. Z toho dôvodu bol navrhnutý model miešacieho zariadenia vychádzajúci zo zariadenia umiestneného v ČOV Třebíč.

5.1 Popis experimentálneho zariadenia

Základným cieľom pri návrhu experimentálneho zariadenia je maximálne dodržať geometrickú podobnosť s reálnym zariadením, v ktorom je miešacie čerpadlo prevádzkované a dodržať podobnosť s reálnymi prevádzkovými parametrami, pretože iba tak je možné maximalizovať vierohodnosť nameraných dát.

Geometrická podobnosť modelového zariadenia je pri návrhu zabezpečená dodržaním geometrických simplexov získaných z reálneho zariadenia. Geometrický simplex je pomer dvoch vybraných parametrov (rozmerov) zariadenia, napríklad výšky a priemeru nádrže. Výsledkom je teda experimentálne zariadenie geometricky podobné reálnemu zariadeniu.

V prípade návrhu experimentálneho zariadenia štandardnej geometrie je na určenie rozmerov možné použiť jednoduchý prístup podobnostného čísla R . Pri výpočte parametrov modelovej nádrže bol učený predpoklad, že reálna nádrž má jednoduchý valcový tvar a základné parametre vychádzali z vyhnívacej nádrže ČOV Havířov (priemer nádrže, výška hladiny, priemer miešadla, priemer hnacieho hriadeľa miešadla). Na výpočet rozmerov bol použitý nasledujúci postup:

- Parametrom na stanovenie podobnostného čísla bola zvolená výška hladiny kvapaliny. Aby bolo experimentálne zariadenie ľahko obslužné, výška hladiny kvapaliny v experimentálnej nádrži bola zvolená $H_{model} = 1,5$ m. V prípade požiadavky je možné zvoliť iný geometrický parameter na stanovenie R .
- Výpočet podobnostného čísla R podľa nasledujúceho vzťahu:

$$R = \frac{H_{model}}{H_{dielo}} = \frac{1,5}{12} = 0,125 \quad (41)$$

- Výpočet geometrických parametrov podľa nasledujúceho vzťahu:

$$MODEL = R * DIELO \quad (42)$$

kde

MODEL... zodpovedajúci geometrický parameter modelu [m]

DIELO..... zodpovedajúci geometrický parameter diela [m]

Výsledky výpočtov sú uvedené v tabuľke 9.

Tabuľka 18 Výsledky výpočtov geometrických parametrov modelu

Parameter	Označení	Jednotka	Dielo	Model
Výška hladiny v nádrži	H	m	12 ⁽¹⁾	1,5 ⁽¹⁾
Priemer nádrže	T	m	10 ⁽¹⁾	1,25 ⁽²⁾
Priemer miešadla	d_m	mm	350 ⁽¹⁾	43,8 ⁽²⁾
Celkový objem nádrže	V	m ³	942,5 ⁽²⁾	1,84 ⁽²⁾

⁽¹⁾ *známa hodnota*

⁽²⁾ *vypočítaná hodnota*

Pri návrhu prevádzkových parametrov modelu je cieľom čo najviac sa priblížiť procesu v reálnom zariadení. Jednou z možností je dodržanie geometrických podobností (rozmery miešadla, výška hladiny ku priemeru nádrže), avšak existuje veľké množstvo situácií, kedy dodržanie geometrických podobností nie je možné. V tom prípade je vhodné zvoliť prístup pracujúci s parametrami procesu.[12] Medzi najčastejšie používané patrí:

- prístup konštantnej rýchlosti hriadeľa miešadla
- prístup konštantnej obvodovej rýchlosti miešadla
- prístup konštantného Reynoldsovho čísla
- prístup konštantného špecifického príkonu P/V
- prístup konštantného Froudovho čísla [12][11][19]

Pre model miešadla vyhnúvacej nádrže bol s dôrazom na zachovanie miery prenosu hmoty zvolený doporučený prístup konštantného špecifického príkonu P/V , tzn. identický príkon miešadla na jednotku objemu nádrže.[19]

Príkon miešadla pri maximálnom čerpacom výkone na diele je známy preto je možné určiť príkon modelového miešadla pri maximálnom čerpacom výkone nasledujúcim postupom:

$$\frac{P_{dielo}}{V_{dielo}} = konst. = \frac{8000 \text{ W}}{942,5 \text{ m}^3} = 8,488 \frac{\text{W}}{\text{m}^3} = \frac{P_{model}}{V_{model}} \Rightarrow P_{model} = V_{model} \cdot 8,488 \cong 16 \text{ W} \quad (43)$$

Čerpacie charakteristiky miešadla nie sú známe, preto bolo na výpočet otáčok modelového miešadla zo známych otáčok miešadla na diele použité pravidlo zväčšovania („scale-up rule“) v nasledujúcom tvare [11]:

$$N_{model} = N_{dielo} \left(\frac{1}{R} \right)^n = 15 \text{ s}^{-1} \left(\frac{1}{0,125} \right)^{\frac{2}{3}} \cong 60 \text{ s}^{-1} \quad (44)$$

kde

N_{model} otáčky modelového miešadla [s^{-1}]

N_{dielo} otáčky reálneho miešadla [s^{-1}]

T_{model} priemer modelovej nádrže [m]

T_{dielo} priemer reálnej nádrže [m]

n exponent, ktorý pre prístup konštantného špecifického príkonu nadobúda hodnotu 2/3 [-]

Výsledky výpočtov prevádzkových parametrov sú uvedené v tabuľke 18.

Tabuľka 19 Výpočet prevádzkových parametrov

Parameter	Označenie	Jednotka	Dielo	Model
Príkon miešadla pri maximálnom čerpacom výkone	P	W	8000 ⁽¹⁾	16 ⁽²⁾
Otáčky miešadla	N_m	s ⁻¹	15 ⁽¹⁾	60 ⁽²⁾
Otáčky miešadla	N_m	min-1	900 ⁽²⁾	3600 ⁽²⁾
Reynoldsovo číslo miešania	Re_m	mm	$2,87 \cdot 10^5$ ⁽²⁾	$1,15 \cdot 10^6$ ⁽²⁾

⁽¹⁾známa hodnota

⁽²⁾ vypočítaná hodnota

Podľa získaných parametrov je možné skonštruovať experimentálne zariadenie.

Stavba skutočnej vyhňivacej nádrže a modelového zariadenia je znázornená na obrázkoch 24 a 25.



Obrázok 24 Reálna stavba vyhňivacej nádrže [34]



Obrázok 25 Stavba modelu vyhnívacej nádrže

5.2 Merania čerpacích charakteristík

Základnými čerpacími charakteristikami sú príkonové kritérium N_p a prietokové kritérium N_q . Ako bolo spomenuté v predchádzajúcej časti, čerpacie charakteristiky popisujú intenzitu miešania v nádobe a sú určené nasledujúcimi vzťahmi [19]:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (46)$$

kde

N_p príkonové kritérium miešadla [-]

P príkon miešadla [W]

N otáčky miešadla [s^{-1}]

ρ hustota miešanej kvapaliny [kg/m^3]

D priemer miešadla [m]

$$N_q = \frac{Q}{ND^3} \quad (47)$$

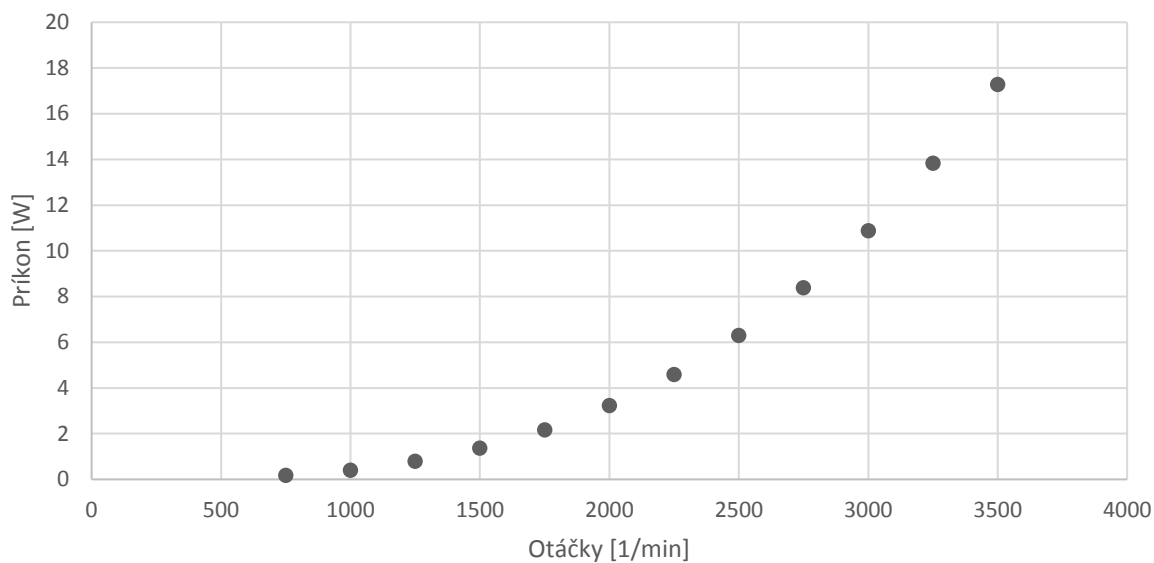
kde

N_q prietokové kritérium miešadla [-]

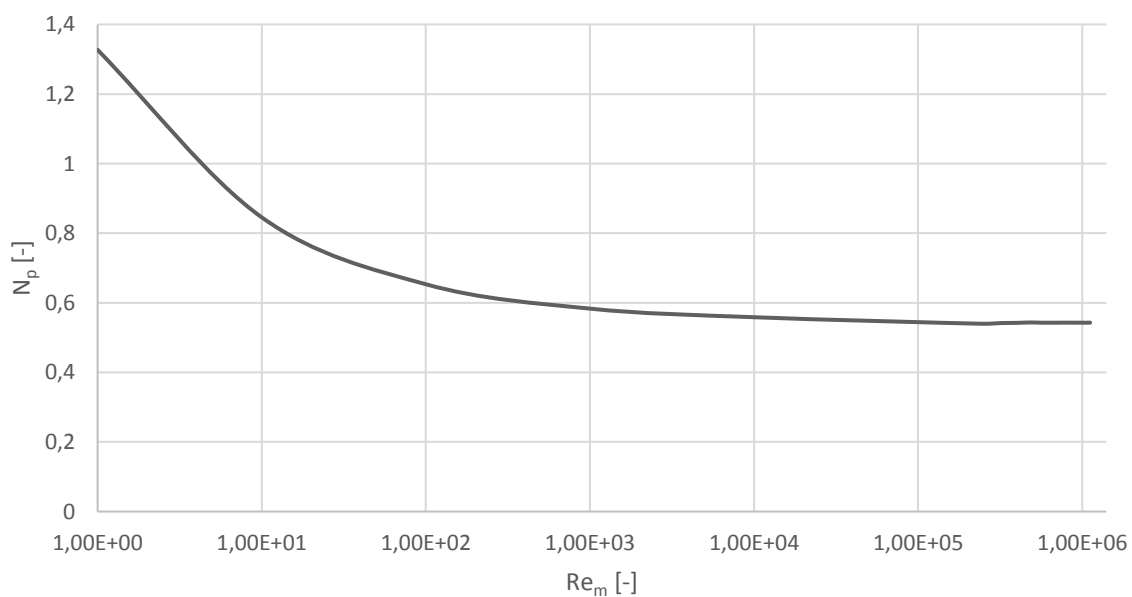
Q prietok kvapaliny čerpanej miešadlom [m^3/s]

Na určenie čerpacích charakteristík je potrebné meranie príkon miešadla, prietok čerpanej kvapaliny a otáčky miešadla. Príkon miešadla získame z merania elektrických veličín elektromotora a započítaním stratového výkonu, ako napríklad straty v prevodovom mechanizme. Otáčky elektromotora sú regulované frekvenčným meničom, získame ich priamo odčítaním resp. dopočtom z inej veličiny. Na meranie prietoku existuje široká škála prietokomerov, voľba konkrétneho meradla závisí na podmienkach experimentu a požadovanej presnosti, prípadne je možné prietok získať nepriamo výpočtom z iných veličín, typicky rýchlosti prúdenia. Namerané dáta sú

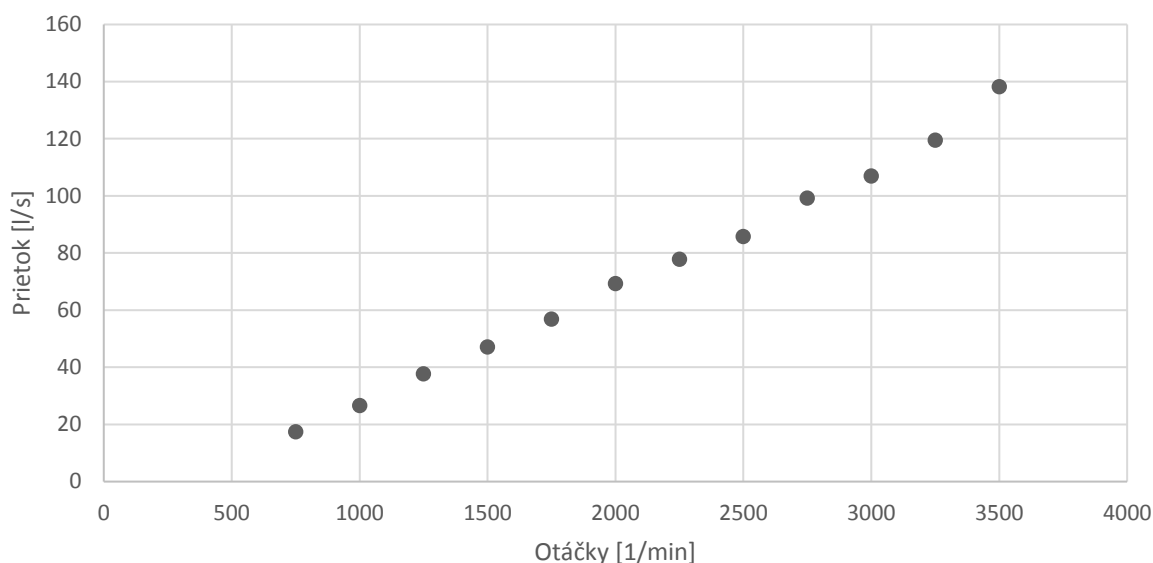
uložené do tabuľkového súboru, spracované a výsledky sú vizualizované grafmi (obrázky 19 až 22).



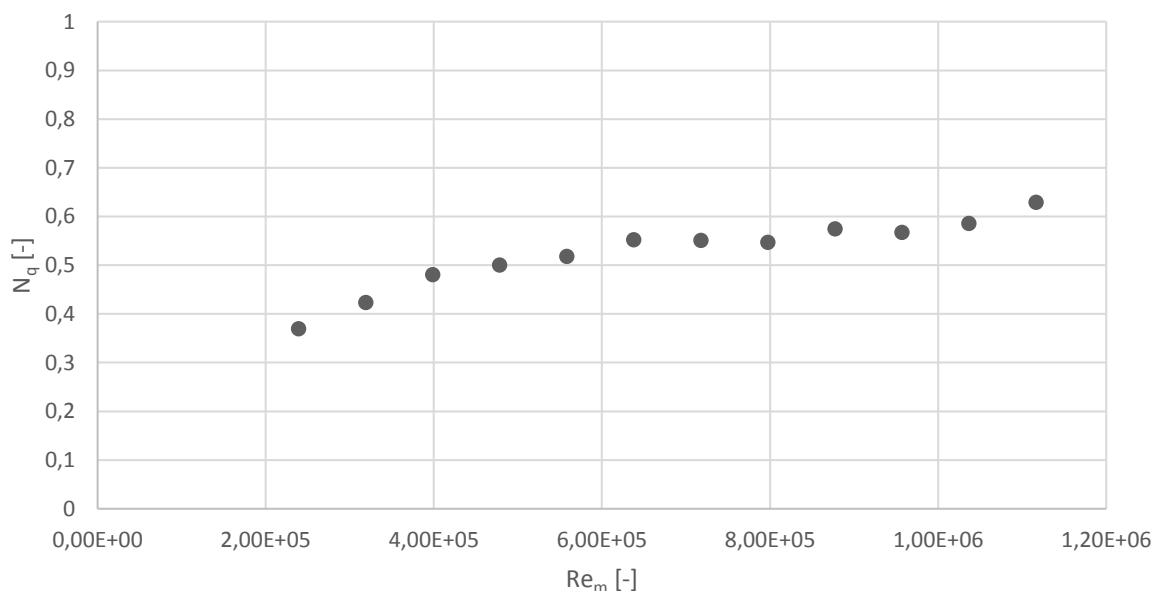
Obrázok 26 Graf závislosti príkonu miešadla na jeho otáčkach



Obrázok 27 Príkonová charakteristika miešadla



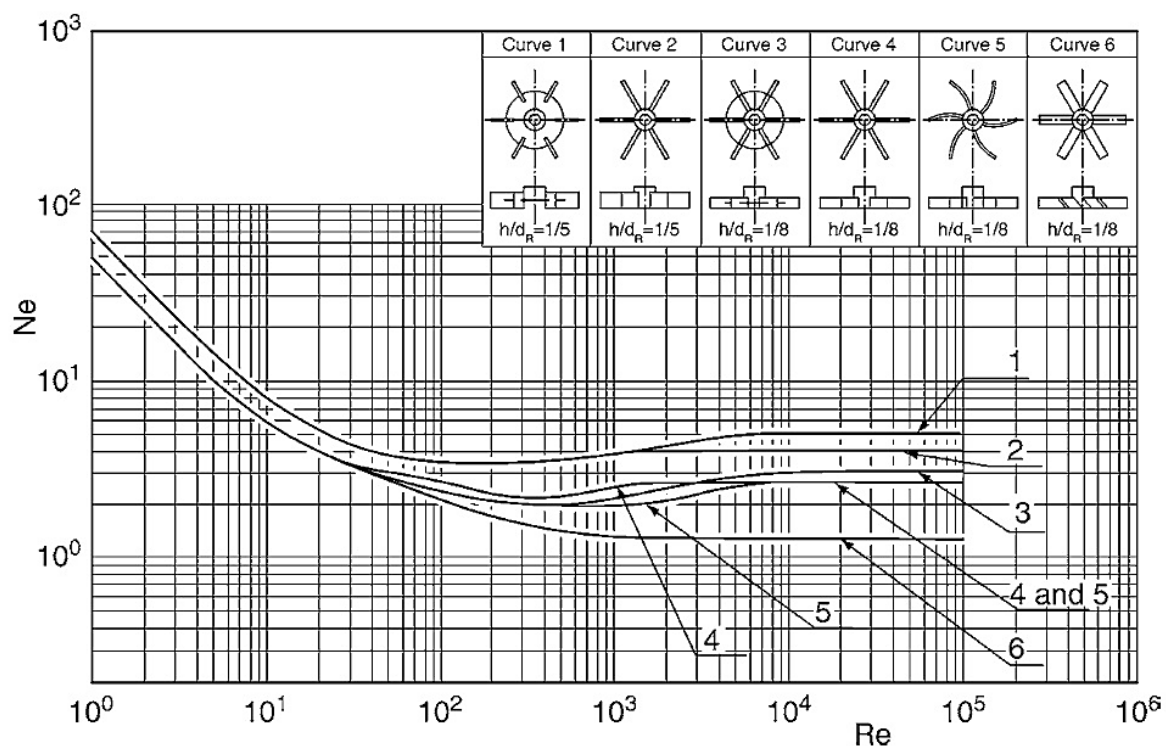
Obrázok 28 Prietok kvapaliny miešadlom



Obrázok 29 Prietoková charakteristika miešadla

5.3 Vyhodnotenie výsledkov

Výsledkom merania sú čerpacie charakteristiky použitého typu miešadla, konkrétne príkonová charakteristika N_p a prietoková charakteristika N_q . Použitím príkonovej charakteristiky je možné vypočítať potrebný príkon miešadla na dosiahnutie požadovaných parametrov miešania, použitím prietokovej charakteristiky je možné zistiť mieru čerpaceho účinku miešadla a zhodnotiť intenzitu procesu miešania. Na obr.23 je znázornená čerpacia charakteristika niekoľkých typov miešadiel. Porovnaním s výsledkom merania je možné potvrdiť správnosť metodiky, pretože trend nameranej charakteristiky je rovnaký ako trend charakteristiky získaný z [2]. Výsledok experimentu zároveň potvrdzuje, že príkonová charakteristika je v oblasti turbulentného miešania ($Re_m > 10^4$) konštantná.



Obrázok 30 Príkonová charakteristika vybraných typov miešadiel [2]

V dobe písania diplomovej práce bolo rozhodnuté všetky informácie o meraní utajiť. Utajenie sa týka nameraných dát potrebných na určenie čerpacej charakteristiky aj parametrov modelového zariadenia. Postup popísaného experimentu je však univerzálny a je možné ho aplikovať na experimentálne meranie čerpacích charakteristík ľubovoľných miešacích čerpadí.

6 ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bol návrh ohrevu vyhniúvacej nádrže prostredníctvom vnútorného výmenníku tepla (ohrevného hada) so zapojením miešania a bez neho.

V prvej časti práce bola uvedená problematika miešaných a ohrievaných priemyselných nádob. Vyhniúvacia nádrž, ako miešaná a ohrievaná nádoba, je súčasťou technológie čistenia odpadových vôd a prebieha v nej proces vyhniúvania (anaeróbného rozkladu, resp. metanizácie) surového čistiarenského kalu. Produktom rozkladu bioplyn (zmes metánu a oxidu uhličitého) a stabilizovaný kal, ktorý nezapácha je hygienicky nezávadný.

V druhej časti práce bol spracovaný prehľad súčasného stavu techniky v oblasti ohrevu a miešania priemyselných nádob. Medzi najpoužívanéjšie metódy ohrevu patrí ohrev prostredníctvom ohrevného plášťa a ohrev prostredníctvom vnútorného tepelného výmenníku. Na základe všeobecných odporúčaní boli vybrané vhodné typy mechanických miešadiel, ktoré sú neskôr použité pri návrhovom výpočte ohrevu.

V tretej časti práce bol vykonaný tepelne-hydraulický výpočet miešanej a ohrievanej nádoby. Skladal sa z určenia termo-fyzikálnych vlastností ohrevných médií, tepelne-hydraulického výpočtu vo vnútri a na vonkajšej strane ohrevného hada, výpočtu doby ohrevu a výpočtu príkonu miešadla. Pri výpočte vlastností médií bolo potrebné zohľadniť skutočnosť, že čistiarenský kal je ne-newtonovská kvapalina, takže jej viskozitu bolo potrebné určiť z experimentálnych dát.

V ďalšej časti bol popísaný vytvorený výpočtový nástroj na výpočet ohrevu miešanej aj nemiešanej nádoby. Vstupnými parametrami sú geometrické parametre zariadení, vlastnosti procesných médií a spôsob ohrevu nádoby. Výstupom nástroja je výpočtový protokol, v ktorom sú uvedené výsledky a najdôležitejšie parametre. Funkčnosť nástroja bola overená jeho aplikáciou pri riešení návrhu ohrevu vyhniúvacej nádrže na ČOV Havířov.

V poslednej časti práce bol popísaný postup merania čerpacích charakteristík miešacieho čerpadla kalu. V priebehu písania práce bolo rozhodnuté o utajení všetkých informácií týkajúcich sa čerpadla uvedeného v zadaní práce, z toho dôvodu bolo navrhnuté iné zariadenie na základe existujúceho zariadenia na ČOV Třebíč. Uvedený postup meranie je univerzálne aplikovateľný pri meraní čerpacích charakteristík ľubovoľného čerpacieho miešadla. Z dôvodu nedostatku finančných prostriedkov nebolo možné vybaviť modelové zariadenie interným výmenníkom tepla a následne posúdiť vplyv miešania na prestup tepla v nádrži. Táto oblasť ostáva predmetom ďalšieho skúmania.

7 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] HEWITT, G.F. Heat exchanger design handbook, 1998. Loose-leaf ed. New York: Begell House, 1998. ISBN 15-670-0097-5.
- [2] VDI heat atlas. 2nd ed. New York: Springer, 2010. ISBN 978-354-0778-769.
- [3] ŠTĚRBÁČEK, Zdeněk a Petr TAUSK. Míchání v chemickém průmyslu. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959. typové číslo L16-B3-4-II/6189 v řadě chemické literatury.
- [4] GRAY, Joseph B., UHL, Vincent W., ed. Mixing: Theory and Practice Volume I. Second Printing. New York and London: Academic Press, 1967. LCCN: 65-26039.
- [5] DOHÁNYOS, Michal. Anaerobní čistírenské technologie. Brno: NOEL 2000, c1998. ISBN 80-860-2019-3.
- [6] COULSON, J. M. a J. F. RICHARDSON. Coulson. 6th Edition. Boston: Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 978-075-0644-440.
- [7] SINNOTT, R. K. Coulson & Richardson's Chemical Engineering Volume 6. Fourth Edition. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0750665386.
- [8] LUDWIG, Ernest E. Applied process design for chemical and petrochemical plants. 3rd ed. Houston: Gulf Pub. Co., 2001. ISBN 978-088-4156-512.
- [10] KAKAÇ, S. a Hongtan. LIU. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2002. ISBN 08-493-0902-6.
- [11] PERRY, Robert H. Perry's chemical Engineer's Handbook. 8.vyd. New York: McGraw-Hill, 2008. DOI: 10.1036/0071422943.
- [12] PAUL, Edward L., Victor A. ATIEMO-OBENG a Suzanne M. KRESTA. Handbook of industrial mixing: science and practice. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2004. ISBN 04-712-6919-0.
- [13] HEWITT, G. F., G. L. SHIRES a T. R. BOTT. Process heat transfer. Boca Raton: Begell House, c1994. ISBN 08-493-9918-1.
- [14] CARPENTER, K. J. Agitated Vessel Heat Transfer. In: Thermopedia [online]. Danbury: Begell House, 2011 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/547/>
- [15] BOTT, T. Reg. TANK COILS. In: Thermopedia [online]. New York: Begell, 2011 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/1176/>
- [16] MARTYNENKO, Oleg G. a A. F. POLIJAKOV. FREE CONVECTION. In: Thermopedia [online]. New York: Begell, 2011 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/786/>
- [17] STAINLESS STEEL DIMPLE JACKETED TANK. In: WOHL Associates, Inc. [online]. New York: WOHL Associates, 2017 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.wohlassociates.com/used-kettles/418-gallon-will-flow-stainless-steel-dimple-jacketed-tank-50-psi.html>

- [18] Jacketed vessel. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Jacketed_vessel
- [19] MEDEK, Jaroslav. *Hydraulické pochody*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2640-3.
- [20] Mixing (process engineering). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Mixing_\(process_engineering\)#/media/File:Agitated_vessel.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Mixing_(process_engineering)#/media/File:Agitated_vessel.svg)
- [21] Edwards MF, Wilkinson WL (1972) Heat transfer in agitated vessels – Part 2: Non-Newtonian fluids. *Chem Eng* 328–335
- [22] *Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů* [online]. 2005 [cit. 2009-11-10]. Dostupné z WWW: <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy2005/Bara/charakter.html>.
- [23] HOUDKOVÁ, L., BORÁŇ J., ELSÄSSER T., BURJANEK F. *Termofyzikální vlastnosti čistírenských kalů II*. CHISA 2007. Plné texty přednášek (CD-ROM). ČSCH: Praha, s. 7. ISBN: 80-86059-47-2.
- [24] ELSÄSSER, T. *Perspective methods of sewage sludge utilisation for energy production*, Písemné pojednání ke státní doktorské zkoušce, Brno 2010.
- [25] ELSÄSSER, T., HOUDKOVÁ, L., BORÁŇ, J., SPONAR, J., STEHLÍK, P.: *Thermal dependences of physical aspects of sewage sludge*. Process Engineering Publisher, článek ve sborníku akce: 17th International Congress of Chemical and Process Engineering. CD-ROM of Full Texts. Praha 2006, pp.P5.66-7. ISBN 80-86059-45-6.
- [26] VŠCHT. *Kalové hospodářství čistíren odpadních vod* [online]. Praha, 2007, 2.10. [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: http://web.vscht.cz/starad/COV_Skripta_Kal_hosp.doc.
- [27] Lyčková, B., Fečko, P., Kučerová R.: *Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů* [online]. Vysoká škola Baňská – Technická univerzita Ostrava. [citováno 20. 1. 2013]. Dostupné z WWW: <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/index.html>.
- [28] EUROFERT s.r.o. *Co je to čistírenský kal?* [online]. 2009. [citováno 20. 1. 2013]. Dostupné z WWW: <http://www.eurofert.cz>.
- [29] ŠTASTA, P. *Využití čistírenských kalů jako alternativního paliva*. Brno, 2009. 147 s. Disertační práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [30] Pitter P., *Hydrochemie kalu*, SNTL Nakladatelství technické literatury, Praha, 1990
- [31] Houdková, L. *Efektivní využití čistírenských kalů*. Brno, 2009. 104 s. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu

procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.

[32] LYČKOVÁ, Barbora, Petr FEČKO a Radmila KUČEROVÁ. *Zpracování kalů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-1600-5.

[33] Ústecký kraj. In: *Možnosti využití energetických zdrojů čistíren odpadních vod a úpraven vod: Případová studie* [online]. Ústí nad Labem, 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: www.kr-ustecky.cz

[34] Digester. In: *Highland Radio* [online]. Pine Hill Letterkenny Co. Donegal Ireland: Highland Radio, 2014 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.highlandradio.com/wp-content/uploads/2014/07/Digester.jpg>

8 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Symbol	Význam	Jednotka
η_z	zdanlivá viskozita	[Pa.s]
τ	šmykové napätie	[Pa]
$\dot{\gamma}$	šmyková rýchlosť	[s ⁻¹]
k_s	konštanta úmernosti	[-]
n_m	otáčky miešadla	[s ⁻¹]
α	súčiniteľ prestupu tepla	[W/(m ² K)]
Nu	Nusseltovo číslo	[-]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
Re_m	Reynoldsovo číslo miešania	[-]
Re_{crit}	Kritické Reynoldsovo číslo	[-]
D_s	priemer špirály	[m]
D_C	priemer vinutia	[m]
D	priemer skrutkovice	[m]
Δp	tlaková strata	[Pa]
ζ	súčiniteľ trenia	[-]
d_i	vnútorný priemer trubky	[m]
d_o	vonkajší priemer trubky	[m]
Ra	Rayleighovo číslo	
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
β	teplotná rozťažnosť	[K ⁻¹]
g	gravitačné zrýchlenie	[m/s ²]
ΔT	rozdiel teplôt	[K]
ν	kinematická viskozita	[m ² /s]
G_C	geometrické korekcia	[-]
μ_R	pomer viskozít	[-]
μ_w	viskozita pri stene	[Pa.s]
μ_z	zdanlivá viskozita	[Pa.s]
K	konštanta úmernosti	[-]

T	teplota	[K]
t	čas	[s]
U	celkový súčiniteľ prestupu tepla	[W/(m ² .K)]
t_t	hrúbka steny	[m]
A	povrch	[m ²]
c_p	tepelná kapacita	[J/(kg.K)]
\dot{m}	hmotnostný prietok	[kg/s]
m	hmotnosť	[kg]
μ	dynamická viskozita	[Pa.s]
N_p	príkonová charakteristika	[K]
N_q	prietoková charakteristika	[K]
Fr	Froudovo číslo	[K]
T	priemer nádrže	[m]
H	výška hladiny	[m]
V_t	objem nádrže	[m ³]
f	súčiniteľ zanášania	[(m ² .K)/W]
λ	tepelná vodivosť	[W/(m.K)]
Q	objemový prietok	[m ³ /s]
